



SYSCOL CONSULTORES S.A.S
Servicios Locales, Soluciones Globales.

CAPITULO 1.8.
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

CONTENIDO

1. OBJETIVOS.....	4
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2. ANTECEDENTES.....	5
3. METODOLOGÍA.....	7
4. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	10
4.1. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	10
4.1.1. Rocas y/o sedimentos con flujo intergranular / porosidad primaria.....	10
4.1.2. Rocas porosas y/o fracturadas/porosidad primaria y secundaria.....	12
4.1.3. Rocas con flujo limitado de agua subterránea.....	18
4.2. HIDROESTRATIGRAFÍA.....	21
4.3. COMPLEJOS HIDROGEOLÓGICOS.....	22
4.3.1. Complejo Cretácico.....	22
4.3.2. Complejo Paleógeno.....	34
4.3.3. Complejo Neógeno – Cuaternario.....	43
4.4. MAPA Y CORTES HIDROGEOLÓGICOS.....	56
BIBLIOGRAFÍA.....	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Descripción de la metodología para la construcción del MHC en el área de estudio.	8
Tabla 2. Relaciones entre el espaciamiento, grado de fracturamiento e interés hidrogeológico.....	16
Tabla 3. Parámetros hidráulicos en las unidades del Complejo Cretácico.	26
Tabla 4. Puntos de agua ubicados sobre el Complejo Cretácico, para la caracterización hidrogeoquímica.....	27
Tabla 5. Resultados de las mediciones realizadas en campo, en los puntos de agua subterránea del Complejo Cretácico.	27
Tabla 6. Resultados de las mediciones en el laboratorio para los puntos de agua subterránea del Complejo Cretácico	28
Tabla 7. Parámetros hidráulicos en las unidades del Complejo Paleógeno	36
Tabla 8. Puntos de agua ubicados sobre el Complejo Paleógeno para la caracterización hidrogeoquímica.....	37
Tabla 9. Resultados de las mediciones realizadas en campo en épocas de lluvia y estiaje para los puntos de agua subterránea del Complejo Paleógeno.	38
Tabla 10. Resultados de las mediciones de laboratorio para los dos puntos ubicados sobre el Complejo Paleógeno en las épocas de lluvia y de estiaje.....	39
Tabla 11. Parámetros hidráulicos en las unidades del Complejo Neógeno - Cuaternario.	48
Tabla 12. Puntos de agua ubicados sobre el Complejo Neógeno - Cuaternario, para la caracterización hidrogeoquímica.	49
Tabla 13. Resultados de las mediciones realizadas en campo, en los puntos de agua subterránea del Complejo Neógeno - Cuaternario.	49
Tabla 14. Resultados de las mediciones en el laboratorio para los puntos de agua subterránea en época de lluvia y de estiaje del Complejo Neógeno – Cuaternario.	50

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Diagrama de flujo metodológico para la construcción del Modelo Hidrogeológico Conceptual.	7
Imagen 2. Columna hidroestratigráfica del área de estudio.	22
Imagen 3. Mapa de recarga por unidad hidrogeológica – Complejo Cretácico	25
Imagen 4. Diagrama de Piper para las muestras de agua subterránea del Complejo Cretácico.....	32
Imagen 5. Diagrama de SCHÖELLER-BERKALOFF para los puntos de agua subterránea del Complejo Cretácico.	33
Imagen 6. Mapa de recarga por unidad hidrogeológica – Complejo Paleógeno. .	35

Imagen 7. Diagrama de Piper para las muestras de agua subterránea en época de lluvia y de estiaje del Complejo Paleógeno. 41

Imagen 8. Diagrama de Schöeller - Berkaloff para los puntos de agua subterránea en época de lluvia y de estiaje del Complejo Paleógeno. 42

Imagen 9. Mapa de distribución de los Depósitos Aluviales y de Terrazas Altas. 44

Imagen 10. Mapa de recarga por unidad hidrogeológica – Complejo Neógeno Cuaternario 45

Imagen 11. Mapa de niveles freáticos para el Complejo Neógeno – Cuaternario. 46

Imagen 12. Corte geológico a partir del mapa de niveles freáticos. 47

Imagen 13. Diagrama de Piper para las muestras de agua subterránea del Complejo Neógeno – Cuaternario. 54

Imagen 14. Diagrama de SCHÖELLER-BERKALOFF para los puntos de agua subterránea en época de lluvia y de estiaje del Complejo Neógeno - Cuaternario. 55

Imagen 15. Mapa hidrogeológico del área de estudio. 57

Imagen 16. Corte (A) hidrogeológico conceptual del municipio de Guasca, Cundinamarca. 59

Imagen 17. Corte (B) hidrogeológico conceptual del municipio de Guasca, Cundinamarca. 60

Imagen 18. Corte (B) hidrogeológico conceptual del municipio de Guasca, Cundinamarca. 61

LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1.** Mapa hidrogeológico del área de estudio a escala 1:25.000
- Anexo 2.** Mapa de distribución de los Depósitos Aluviales y de Terrazas Altas
Corte hidrogeológico A
- Anexo 3.** Corte hidrogeológico A
- Anexo 4.** Corte hidrogeológico B
- Anexo 5.** Corte hidrogeológico C

1. OBJETIVOS.

1.1. OBJETIVO GENERAL.

Precisar un modelo hidrogeológico conceptual para los acuíferos en el municipio de Guasca

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Definición y caracterización de unidades hidrogeológicas.

Identificación de zonas de recarga, almacenamiento y descarga del sistema hidrogeológico planteado.

Caracterización hidráulica de las principales unidades hidrogeológicas con base a la información existente y la interpretación de las pruebas de bombeo.

2. ANTECEDENTES

El área de estudio comprende la superficie interceptada por los límites del municipio de Guasca y las subcuencas Embalse Tominé y Río Teusaca, situadas en la Sabana de Bogotá. Geográficamente estas subcuencas se localizan en la Cuenca Alta del Río Bogotá con una extensión. 224.258 hectáreas.

La Sabana de Bogotá cuenta con diversos estudios realizados para aportar al conocimiento hidrogeológico de la región y evaluar el potencial del agua subterránea, entre los que se destacan:

RODRIGUEZ, Cesar y JIMENEZ, German A. Datación del agua subterránea en la Sabana de Bogotá y sus implicaciones Hidrogeológicas. En: Geología Colombiana, 1986. no.15, p. 205-218.

INGEOMINAS – DIVISIÓN HIDROGEOLOGÍA. Mapa hidrogeológico – Sector Sisga, Tibitó y Embalse de Tominé: Ingeominas., 1992.

ALVAREZ OSEJO, Alberto. Estudio hidrogeológico cuantitativo de la Sabana de Bogotá. Informe Hidrogeológico del sector Sisga-Tibitó y Embalse de Tominé, Sabana de Bogotá. Bogotá: Ingeominas., 1993.

ROBLES, Emiro. Hidrogeología de la Cuenca del río Teusaca, Sabana de Bogotá. Bogotá: Ingeominas., 1993.

ALVAREZ Osejo, Alberto. Acuíferos de la Formación Tiltatá (Mioceno-Plioceno) en dos pozos del Suroeste de la Sabana de Bogotá. En: Geología Colombiana. 1998, vol. 23, p. 79-95.

CORPOGUAVIO. Estudio de zonificación para racionalizar el aprovechamiento de aguas subterráneas y actualización de expedientes de pozos profundos en el municipio de Guasca (Cundinamarca). Bogotá D.C: García González Ltda., 2000.

INGEOMINAS. Caracterización Geoquímica e isotópica de los acuíferos de la Cuenca Alta del río Bogotá. Bogotá D.C: CAR., 2001.

BERMOUDES, Olga. y VELANDIA, Francisco. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá. Bogotá: Ingeominas., 2002a.

BERMOUDES, Olga. y VELANDIA, Francisco. Hidrogeología regional de la Sabana de Bogotá. Bogotá: Ingeominas., 2002b.



BRICEÑO, Luis y ARANGO, Irene. Modelamiento Geoeléctrico y Gravimétrico de un sector del suroeste de la Sabana de Bogotá. En: Geofísica Colombiana. 2000. no. 4, p. 43-60.

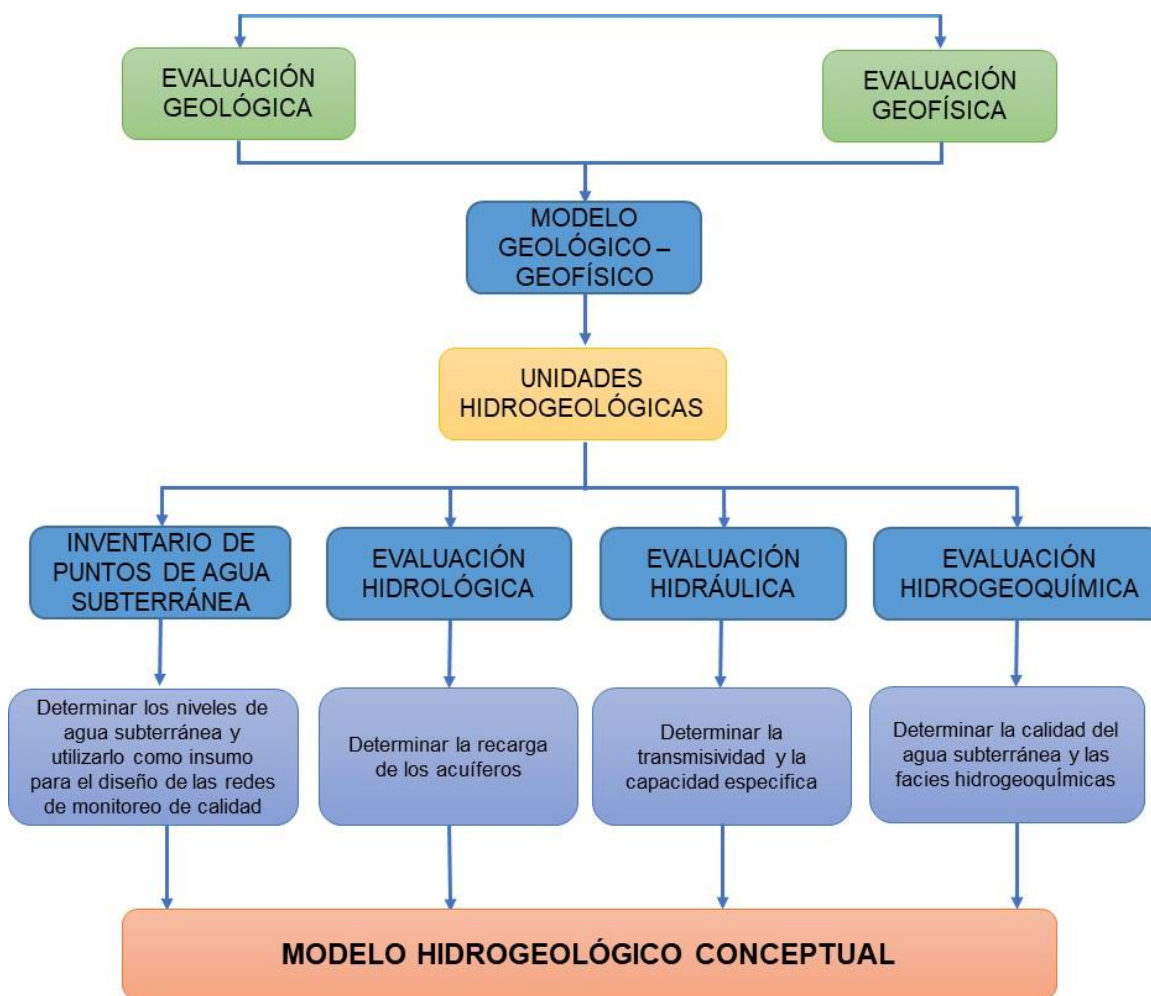
CAR. Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Cuenca del río Bogotá. Bogotá: Ecoforest Ltda – Planeación Ecológica Ltda., 2006.

EMPRESA COLOMBIANA DE PERFORACIÓN LTDA. Prospección de aguas subterráneas Vereda Las Flores en el municipio de Guasca – Cundinamarca. Bogotá, D.C., 2010.

3. METODOLOGÍA

Un MHC es la simplificación esquemática de la naturaleza en la que se intenta representar las condiciones hidrogeológicas reales del área de estudio. El MHC del municipio de Guasca se realizó a partir del análisis e integración de información geológica, geofísica, hidrológica, del inventario de puntos de agua subterránea, hidráulica e hidrogeoquímica, permitiendo la identificación y caracterización de las unidades hidrogeológicas localizadas en el área de estudio. La metodología empleada para la creación los MHC del área de estudio se muestra en la imagen 1.

Imagen 1. Diagrama de flujo metodológico para la construcción del Modelo Hidrogeológico Conceptual.



Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

A partir de la información capturada durante la fase de campo se determinaron cada uno de los diferentes componentes para la creación del MHC, el cual es representado por medio de perfiles hidrogeológicos que permiten conocer el comportamiento hidrogeológico del área de estudio. La tabla 1 muestra cada una de las actividades realizadas durante la fase de campo para cada componente del MHC y su respectivo resultado.

Tabla 1. Descripción de la metodología para la construcción del MHC en el área de estudio.

Descripción de la Metodología		
Recolección de información	Análisis de información	Resultados
Evaluación Geología	<p>Dos campañas de campo.</p> <ul style="list-style-type: none"> - 175 estaciones para el levantamiento de información geológica. - 37 datos de estratificación. - 152 datos de diaclasas. - 12 caracterizaciones de macizo rocoso. <p>Análisis del modelo digital de terreno.</p>	<p>Mapa y cortes geológicos.</p> <p>Dirección preferencial de las diaclasas.</p> <p>Caracterización del macizo rocoso.</p> <p>Determinación de la porosidad primaria.</p>
Evaluación Geofísica	<p>Una campaña de campo para adquisición de datos geofísicos.</p> <ul style="list-style-type: none"> - 60 Sondes Eléctricas Verticales (SEV). 	<p>Espesores y profundidades de las unidades litoestratigráficas.</p> <p>Modelo geológico - geoléctrico</p>
Inventario de puntos de agua subterránea	<p>Una campaña de campo para levantamiento de información donde se usó el Formulario Único Nacional de Aguas Subterráneas (FUNIAS).</p> <ul style="list-style-type: none"> - 71 puntos de agua subterránea: 11 pozos, 52 aljibes y 8 manantiales. 	<p>Actualización del inventario de puntos de agua subterránea.</p> <p>Sistema y dirección de los flujos de agua subterránea (mapa piezométrico).</p> <p>Insumo para las redes de monitoreo de calidad del agua subterránea.</p>
Perforación exploratoria	<p>Una campaña de campo para la definición del sitio para la perforación exploratoria teniendo en cuenta los resultados de la evaluación geológica y geofísica.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Construcción de un pozo exploratorio en la Formación Cacho. - Toma de registros eléctricos del pozo. - Levantamiento de la columna litológica del pozo. - Prueba bombeo de pozo profundo. 	<p>Interpretación y correlación de registros eléctricos con la columna litológica.</p> <p>Identificar las características hidráulicas del acuífero.</p>

Descripción de la Metodología

Recolección de información	Análisis de información	Resultados
Evaluación Hidrológica	<p>Análisis e interpretación de información.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Registros históricos de las variables hidrológicas suministradas por el IDEAM. - Mapa de tipo de suelo (IGAC, 2000). - Mapa de Cobertura vegetal (CORPOGUAVIO, 2010). 	<p>Caracterización espacial y temporal de las variables climatológicas.</p> <p>Zonificación climática (CALDAS –LANG).</p> <p>Balance hídrico a nivel medio mensual.</p> <p>Recarga potencial.</p> <p>Balance hídrico mensual de la humedad del suelo.</p> <p>Recarga potencial diferenciada para cada tipo de suelo.</p>
Evaluación Hidráulica	<p>Una campaña de campo para la realización de 4 pruebas de bombeo.</p>	<p>Estimar los parámetros hidráulicos del acuífero.</p>
Evaluación Hidrogeoquímica	<p>Una campaña de campo para la identificación y posterior recolección de 9 muestras de agua, a las cuales se les realizó análisis de los parámetros físico - químicos y bacteriológicos.</p>	<p>Determinar la calidad del agua.</p> <p>Clasificación de las aguas a partir de las concentraciones de los iones y cationes (<i>facies</i> hidrogeoquímicas).</p>

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

4. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

4.1. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

De acuerdo con las características físicas (litología, porosidad y permeabilidad) de las unidades de roca y depósitos existentes en el área de estudio, se definieron 11 unidades hidrogeológicas, las cuales se clasificaron en tres grupos, como se describen a continuación.

4.1.1. Rocas y/o sedimentos con flujo intergranular / porosidad primaria

Los sedimentos no consolidados y rocas que pertenecen a este grupo son: 1) Depósitos Cuaternarios de origen Aluvial y de Terrazas Altas, compuestos por capas de gravas y arenas con buena permeabilidad, la cual está limitada por la presencia de arcillas; 2) Formación La Regadera, conformada por conglomerados y areniscas con esporádicas intercalaciones de arcillas, de ambiente de sedimentación en sistemas de canales trenzados; y 3) la Formación Tiltatá, compuesta por capas de arcillas y limos, arenas y gravas de origen aluvial.

4.1.1.1. Formación La Regadera

La Formación La Regadera aflora en las veredas Santa Bárbara, Pastor Ospina, La Floresta, Santa Ana, La Trinidad y Santa Lucía, en el núcleo del Sinclinal de Sisga y geomorfológicamente se presenta como una serie de colinas en el valle de Guasca¹. Esta formación está compuesta por capas tabulares muy gruesas y poco consolidadas de cuarzoareniscas de grano medio a grueso, moderadamente calibradas, intercaladas con capas de conglomerados y capas medias de arcillolitas con intercalaciones de arenisca de grano fino. El espesor para esta formación es de 660 metros para una sección compuesta levantada en el sinclinal de Sisga en la vereda Suralá y sobre la carretera Sisga - Machetá². A partir de los resultados obtenidos en la prospección geofísica se establecieron tres rangos de resistividad, el primer rango con valores entre 896 y 3.227 Ohm.m asociado litológicamente a conglomerados y/o areniscas compactas, un segundo rango con valores entre 164 y 691 Ohm.m asociado a conglomerados y/o areniscas friables saturadas y finalmente, un tercer rango con valores de resistividad entre 73 y 120 Ohm.m

¹ CORREDOR, V., y TERRAZA, R. Geología de la plancha 228 Bogotá Noreste. Bogotá: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO., 2015.

² MONTOYA, D., y REYES, G. Geología de la Sabana de Bogotá. Bogotá: INGEOMINAS., 2005.

relacionados con areniscas friables saturadas e intercalaciones de arcillolitas. A partir de los resultados de los SEV_19; SEV_20 y SEV_44 localizados sobre la Formación La Regadera y los SEV_18, SEV_58, SEV_53 localizados sobre los Depósitos Aluviales, y la Formación Bogotá, se estimó un espesor máximo de 172 metros para la Formación La Regadera. De acuerdo con sus características litológicas y los resultados de la prospección geofísica la Formación La Regadera podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero con un potencial hidrogeológico medio.

4.1.1.2. Formación Tilatá

La Formación Tilatá aflora en el casco urbano del municipio y en las veredas El Santuario, Santa Bárbara, Pastor Ospina y Las Flores, al norte del área de estudio, entre la Falla Chocontá – Pericos y el eje del Sinclinal del Sisga, esta formación presenta una morfología de terrazas alomadas de gran extensión en forma de abanicos explayados con pendientes suaves e inclinadas³. Litológicamente, la formación se divide en cuatro miembros: 1) Miembro Tequendama (arenas y gravas con intercalaciones de arcillas); 2) Miembro Tibagota (gravas y arenas, localmente arcillas); 3) Miembro Guasca (arcillas con intercalaciones de arenas); y 4) Miembro Gualí (arcillas y limos, algunas capas de arenas). El espesor de la Formación Tilatá para el Miembro Tequendama es de máximo 65 metros, el Tibagota y el Guasca, de 20 metros cada uno y el equivalente al Miembro Gualí, 110 metros⁴. A partir de los resultados obtenidos en la prospección geofísica se establecieron dos rangos de resistividad, el primer rango con valores entre 15 y 32 Ohm.m, asociado litológicamente a arcillas limosas y un segundo rango con valores entre 49 y 74 Ohm.m relacionado con arenas saturadas con intercalaciones de limos y arcillas. A partir de los resultados de los SEV_1; SEV_2, SEV_25 y SEV_57 localizados sobre la Formación Tilatá y los SEV_4, SEV_5 y SEV_6 localizados sobre los Depósitos Aluviales, se estimó un espesor para la Formación Tilatá que varía entre 13 y 118 metros. De acuerdo con sus características litológicas y los resultados de la prospección geofísica, La Formación Tilatá podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero de tipo multicapa, donde las capas de arena constituyen el acuífero y las capas arcillosas corresponden a capas confinantes a semiconfinantes, el cual posee un potencial hidrogeológico de medio a alto.

³ MONTOYA, D., y REYES, G. Op. Cit., p. 103.

⁴ HELMENS, K. Neogene-Quaternary geology of the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia. Berlín:Editorial Gebrüder Borntraeger. 202 pág., 1990, Citado por CORREDOR y TERRAZA. Op. Cit., p. 79.

4.1.1.3. Depósitos Cuaternarios Aluviales y de Terrazas Altas

Los Depósitos Aluviales y de Terrazas Altas se encuentran distribuidos a lo largo del área de estudio cubriendo el valle de Guasca y el valle del río Teusaca como geofomas aplanadas formando llanuras y terrazas altas; estos depósitos se destacan por presentar gran extensión. Litológicamente estos depósitos están conformados por material no consolidado areno limosos y sedimentos conglomeráticos que van de guijos a bloques de hasta 1 metro embebidos en una matriz areno – arcillosa con lentes arcillosos y arenosos, los cuales presentan formas redondeadas a subredondeadas y subangulares, de moderadamente a mal seleccionados. Los Depósitos Aluviales pueden alcanzar hasta 100 metros de espesor en la Sabana de Bogotá y hasta 30 metros alrededor del municipio de Guasca⁵. De acuerdo a los resultados obtenidos en la prospección geofísica se establecieron cuatro rangos de resistividad, el primer rango con valores entre 3 y 30 Ohm.m, asociado litológicamente de arcillas a arcillas limosas, un segundo rango con valores entre 32 y 98 Ohm.m, asociado litológicamente a arenas saturadas con diferente proporción de arcillas y limos, un tercer rango con valores entre 134 y 641 Ohm.m, asociado litológicamente a arenas y/o gravas saturadas y finalmente, un cuarto rango con valores entre 694 y 2.610 Ohm.m, asociado litológicamente a arenas y/o gravas no saturadas (secas) o parcialmente saturadas. Para los Depósitos Aluviales, a partir de los resultados de los SEV_4; SEV_5, SEV_6, SEV_18, SEV_30, SEV_31; SEV_33, SEV_34; SEV_36; SEV_37, SEV_38, SEV_39, SEV_40, SEV_43, SEV_45, SEV_46, SEV_54 y SEV_56, se estimó un espesor que varía entre 2 y 73 metros. Para los Depósitos de Terrazas Altas a partir de los SEV_21, SEV_22; SEV_23 y SEV_30, se estimó un espesor que varía entre 20 y 38 metros. De acuerdo con las características litológicas y los resultados de la prospección geofísica, los Depósitos Cuaternarios Aluviales y de Terrazas Altas podrían clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero con un potencial hidrogeológico medio.

4.1.2. Rocas porosas y/o fracturadas/porosidad primaria y secundaria

En este grupo se pueden incluir las rocas sedimentarias marinas del Cretácico Superior y rocas del Paleoceno Superior, representadas por: 1) Formación Arenisca Dura, compuesta por cuarzoareniscas de grano muy fino a fino intercaladas con arcillolitas, de ambiente de plataforma interior a media; 2) Formación Plaeners, compuesta por liditas, arcillolitas y limolitas intercaladas con areniscas, de ambiente de plataforma externa a media; 3) Formación Labor y Tierna compuesta por

⁵ BERMOUDES, O., y VELANDIA, F. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá. Bogotá: INGEOMINAS., 2002.

arenisca cuarzosa de grano fino a muy fino con intercalaciones de limolitas, arcillolitas y liditas, de ambiente marino somero litoral; y 4) Formación Cacho compuesta por cuarzoarenisca de grano fino a conglomerático intercalado con arcillolitas y depositadas en un ambiente de ríos trenzados.

4.1.2.1. Formación Arenisca Dura

La Formación Arenisca Dura aflora al este del área de estudio bordeando el Anticlinal de Río Blanco – Mchetá y la Falla de Siecha y al oeste bordeando las fallas asociadas a la Falla Choconta – Pericos y el Sinclinal El Santuario, se caracteriza por formar filos muy pronunciados y presenta pendientes fuertes⁶. Esta formación se presenta como una secuencia de cuarzoareniscas de grano muy fino a fino en capas tabulares, compactas, moderadamente a muy bien calibradas, con granos subangulares a redondeados y masivas, las cuales se encuentran intercaladas con arcillolitas y lutitas en capas delgadas. De acuerdo con Pérez y Salazar (1978)⁷ esta formación presenta un espesor de 450 metros. A partir de los resultados obtenidos en la prospección geofísica se establecieron tres rangos de resistividad, el primer rango con valores entre 11 y 63 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de lodolitas con intercalaciones delgadas de areniscas, un segundo rango con valores entre de 95 y 140 Ohm.m, asociadas litológicamente a capas gruesas de areniscas fracturadas saturadas con intercalaciones delgadas de lodolitas y finalmente, un tercer rango con valores iguales a 2.609 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de areniscas compactas, con intercalaciones delgadas de lodolitas. A partir de los resultados del SEV_49 localizado sobre esta formación se estimó un espesor de 106 metros. De acuerdo con sus características litológicas y los resultados de la prospección geofísica la Formación Arenisca Dura podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero con flujo esencialmente a través de fracturas, con un potencial hidrogeológico medio.

4.1.2.2. Formación Plaeners

La Formación Plaeners aflora al este del área de estudio bordeando el Anticlinal del Río Blanco – Mchetá y la Falla Suralá y al oeste bordeando las fallas asociadas a la Falla Chocontá – Pericos y el Sinclinal El Santuario, presenta una morfología suave⁸. Esta formación está compuesta por liditas o porcelanitas dispuestas en

⁶ CORREDOR y TERRAZA. Op. Cit., p. 57.

⁷ PEREZ, G. y SALAZAR A. Estratigrafía y *facies* del Grupo Guadalupe. En: Geología Colombiana. 1978. no.10, p. 6-85.

⁸ CORREDOR y TERRAZA. Op. Cit., p. 61.

capas medias a muy delgadas, arcillolitas desde láminas delgadas a gruesas intercaladas con limolitas y lodolitas dispuestas en capas muy delgadas a muy gruesas y cuarzoareniscas de grano medio, fino y muy fino en capas muy gruesas, moderadamente calibradas, con granos redondeados y subredondeados muy bien cementadas. En la plancha 228 Bogotá Noreste se reporta un espesor de 100 metros determinados a partir de perfil geológico⁹. A partir de los resultados obtenidos en la prospección geofísica se establecieron tres rangos de resistividad, el primer rango con valores iguales a 9 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de lodolitas, un segundo rango con valores entre 147 y 328 Ohm.m, asociado a capas de areniscas y liditas fracturadas saturadas, con intercalaciones delgadas de lodolitas y finalmente, un tercer rango con valores entre 2.280 y 3.583 Ohm.m, asociado a capas de areniscas y liditas compactas, con intercalaciones delgadas de lodolitas. A partir de los resultados del SEV_12 localizado sobre los depósitos coluviales, se estimó un espesor de 82 metros para la Formación Plaeners. De acuerdo con las características litológicas y los resultados de la prospección geofísica la Formación Plaeners podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero con flujo esencialmente a través de fracturas, con un potencial hidrogeológico de medio a bajo.

4.1.2.3. Formación Arenisca de Labor y Tierna

La Formación Arenisca Labor y Tierna aflora al este del área de estudio bordeando las fallas Los Picachos, Siecha y El Chachal y al oeste bordeando las fallas asociadas a la Falla Chocontá – Pericos y el Sinclinal El Santuario; se caracteriza geomorfológicamente por formar escarpes fuertes y pronunciados¹⁰. Esta formación está compuesta por cuarzoareniscas de grano muy fino a medio dispuestas en capas tabulares o lenticulares delgadas a muy gruesas, los granos son redondeados a subangulares con buena selección con intercalaciones de arcillolitas en capas delgadas a muy gruesas, limolitas en láminas delgadas a capas medias y liditas en capas delgadas a medias. El espesor estimado por perfil geológico en la plancha 228 Bogotá Noreste es de al menos 300 metros¹¹. Pérez y Salazar (1978)¹² reportan 226 metros para la Formación Arenisca de Labor y Tierna. A partir de los resultados obtenidos en la prospección geofísica se establecieron tres rangos de resistividad, el primer rango con valores entre 531 y 2.126 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de areniscas compactas, con intercalaciones delgadas de lodolitas, el segundo rango con valores de resistividad entre 102 y 285 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de areniscas fracturadas saturadas, con

⁹ Ibid. p. 63

¹⁰ Ibid. p. 38.

¹¹ Ibid. p. 65.

¹² PEREZ y SALAZAR Op. Cit., p. 38.

intercalaciones delgadas de lodolitas y finalmente, un tercer rango con valores entre 5 y 87 Ohm.m, asociado litológicamente a lodolitas intercaladas con areniscas.

Caracterización del macizo rocoso

La caracterización del macizo rocoso está basada en el análisis del fracturamiento relacionado con la presencia de diaclasas. Algunas de estas discontinuidades pueden permitir la circulación del agua a través suyo, siempre y cuando se trate de fracturas interconectadas y tengan una apertura mínima que permita la circulación de un cierto caudal. La infiltración del agua a través de fracturas se favorece en la medida que existe una mayor densidad de fracturas que afloran en superficie¹³.

La cuantificación de diversos parámetros en la caracterización del macizo rocoso permite determinar el interés hidrogeológico. Las características de las diaclasas determinadas en el presente estudio incluyen:

- Continuidad: es una medida de la longitud de la fractura en una superficie expuesta, como algunas discontinuidades son más persistentes y continuas que otras, este parámetro facilita el flujo del agua subterránea¹⁴.
- Abertura: es la distancia perpendicular que separa las paredes de una discontinuidad abierta, en la que el espacio intermedio puede estar relleno o vacío. Por lo tanto, cuando se considera el flujo de aguas subterráneas, las aberturas se definen en términos de las propiedades del fluido, ya que el caudal volumétrico está determinado por el cubo de la abertura. La abertura se puede integrar con la densidad de fractura para evaluar la conductividad hidráulica de un macizo rocoso¹⁵.
- Rugosidad: las paredes de las fracturas no siempre son superficies paralelas lisas y planas, ya que contiene irregularidades. La rugosidad reduce el flujo de agua y genera una canalización del flujo dentro de la formación, la rugosidad reduce la porosidad efectiva y produce una velocidad de flujo irregular¹⁶.
- Relleno: es el material sólido que se encuentre entre las paredes adyacentes de una discontinuidad o diaclasa y está ligado al tipo de material el cual puede ser arena, gouge de falla, brecha, chert, calcita, etc. El material de

¹³ ULLOA, A. y GÓMEZ, S. Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la región central del Departamento de Santander. *ACUERDO ESPECIFICO*, 2007, vol. 2, p. 2005.

¹⁴ SINGHAL, Brij Bhusan Saran y GUPTA, Ravi P. Applied hydrogeology of fractured rocks. Roorkee, India: Springer Science & Business Media, 2010. 415 p. ISBN 978-90-481-8799-7.

¹⁵ Ibid. p. 31.

¹⁶ Ibid. p. 31.

relleno puede ser homogéneo o heterogéneo y podría rellenar parcial o completamente la diaclasa. El material puede tener una permeabilidad variable, dependiendo de la mineralogía, tamaño de grano y el espacio que ocupe. El efecto neto del relleno de la pared y la filtración es la reducción de la abertura por lo cual se reduce su interés hidrogeológico¹⁷.

- Grado de meteorización de la roca: es una observación importante en cuanto que condiciona de forma definitiva sus propiedades mecánicas. Según avanza el proceso de meteorización aumentan la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso, al tiempo que disminuye su resistencia¹⁸.
- Densidad e intensidad de fracturamiento: permiten identificar las zonas con mayor porosidad secundaria en un macizo rocoso, ya que donde se encuentren los valores más altos de dicha porosidad será mayor el rango de intensidad y densidad¹⁹.

Espaciado: las diaclasas son aproximadamente equidistantes y poseen paralelismo y por lo tanto el parámetro estadístico del espaciamiento tiene importancia ya que describe el promedio de la distancia perpendicular entre dos discontinuidades adyacentes del mismo set. Tiene una gran influencia sobre la permeabilidad de las rocas y el flujo de agua subterránea²⁰.

Tabla 2. Relaciones entre el espaciamiento, grado de fracturamiento e interés hidrogeológico.

Espaciado (mm)	Rango de espaciamiento	Grado densidad del fracturamiento	Interés hidrogeológico
<200 mm	Extremadamente junto a junto	Alto	Alto
200 – 600	Junto a moderadamente junto	Medio	Medio
600 – 6.000	Moderadamente junto a muy separado	Baja	Bajo

¹⁷ Ibid. p. 31.

¹⁸ GONZALEZ DE VALLEJO, L, et al. Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Prentice Hall, 2002. 744p.

¹⁹ CASTELLANOS Estefanía y CETINA María. Determinación de patrones de fracturamiento y análisis cinemático en inmediaciones del Municipio de Charta, Macizo de Santander. Trabajo de grado Geóloga. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología, 2013. 151 p.

²⁰ SINGHAL, Brij Bhusan Saran y GUPTA, Ravi P. Op. Cit., p.26.

Espaciado (mm)	Rango de espaciamiento	Grado densidad del fracturamiento	Interés hidrogeológico
>6.000	Extremadamente separado	Muy Baja	Muy Bajo

Fuente: Tomado y modificado de proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la región central del departamento de Santander, 2007.

De acuerdo con las características macizo rocoso se determinó para la Formación Arenisca de Labor y Tierna un interés hidrogeológico medio ya que los resultados muestran un espaciado con una tendencia que va de moderadamente junto a junto y un grado de densidad de fracturamiento con una tendencia de medio a bajo. La continuidad de las diaclasas presenta una tendencia que va de moderada a baja, la abertura de las diaclasas presenta una tendencia que va de abierta a parcialmente cerrada, para el parámetro de rugosidad se tiene que las diaclasas son de tipo onduladas con un rango que van de rugosas a lisas, el relleno de las aberturas está compuesto por material arenoso - arcilloso y se caracteriza por no presentar humedad.

Por lo tanto, de acuerdo características litológicas, los resultados de la prospección geofísica y la caracterización del macizo rocoso, la Formación Arenisca de Labor y Tierna podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero de doble porosidad (flujo intergranular y a través de fracturas) de tipo multicapa, con un potencial hidrogeológico de medio a alto.

4.1.2.4. Formación Cacho

La Formación Cacho aflora al este del área de estudio bordeando la Falla de Suralá, al oeste bordeando la Falla Chocontá – Pericos y al norte alrededor del eje del Anticlinal de Guatavita; geomorfológicamente se presenta en filos de hasta 200 metros de altitud, muy fuertes y escarpadas²¹. Esta formación consiste principalmente en capas muy gruesas, gruesas y medias de cuarzoarenisca de tamaño de grano fino a medio, que varían de grueso a conglomerado a la base, las cuarzoareniscas van de bien a moderadamente calibradas con granos redondeados, se encuentran intercaladas con capas medias a delgadas de arcillolitas. El espesor de la formación de acuerdo con Corredor y Terraza (2015) es de aproximadamente 100 metros. A partir de los resultados obtenidos en la prospección geofísica se establecieron dos rangos de resistividad, el primer rango con valores entre 113 y 412 Ohm.m, asociado litológicamente a areniscas saturadas, con diferente proporción de conglomerados e intercalaciones de arcillolitas y un segundo rango de valores anómalos iguales a 46.240 Ohm.m,

²¹ CORREDOR y TERRAZA. Op. Cit., p. 71.

asociado litológicamente a capas muy compactas de la Formación Cacho. A partir de los resultados de los SEV_31; SEV_34, SEV_37 y SEV_54 localizados sobre los Depósitos Aluviales, se estimó un espesor que varía entre 37 y 99 metros para la Formación Cacho.

Caracterización del macizo rocoso

Para la caracterización del macizo rocoso de la Formación Cacho, se tuvieron en cuenta los mismos parámetros analizados en la Formación Arenisca de Labor.

Para la Formación Cacho se determinó un interés hidrogeológico medio ya que los resultados de la caracterización del macizo rocoso muestran un espaciado con una tendencia que va de moderadamente junto a separado y un grado de densidad de fracturamiento con una tendencia de alto a bajo. La continuidad de las diaclasas presenta una tendencia baja, la abertura de las diaclasas presenta una tendencia de abierta a moderadamente abierta, para el parámetro de la rugosidad se tiene que las diaclasas son de tipo onduladas con un rango que va de lisa a rugosa, el relleno está compuesto por material arenoso - arcilloso y se caracteriza por presentar humedad. Esta formación en general presenta una meteorización media, la densidad presenta un rango que tiende de alta a baja y un rango de intensidad que tiende a ser medio.

Por lo tanto, de acuerdo a sus características litológicas, los resultados de la prospección geofísica y la caracterización del macizo rocoso, la Formación Cacho podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero de doble porosidad (flujo intergranular y a través de fracturas), con un potencial hidrogeológico de medio a alto.

4.1.3. Rocas con flujo limitado de agua subterránea

En esta categoría se incluyen las secuencias de carácter predominantemente arcilloso y los Depósitos de origen Fluvioglacial y Coluvial, conformados por: 1) Formación Chipaque, la cual se presenta como una secuencia en la que predominan las arcillolitas y limolitas intercaladas con areniscas de grano muy fino, de ambiente de costa afuera; 2) Formación Guaduas, compuesta por arcillolitas con intercalaciones esporádicas de areniscas, de ambiente de llanuras aluviales; 4) Formación Bogotá, compuesta por arcillolitas y limolitas con intercalaciones esporádicas de arenisca cuarzosa, de ambiente de ríos meandriformes; y 5) Depósitos Fluvioglaciares y Coluviales compuestos por arenas y gravas no consolidados embebidos en una matriz areno – arcillosa.

4.1.3.1. Formación Chipaque

La Formación Chipaque aflora al este del área de estudio formando el núcleo del Anticlinal de Río Blanco – Machetá y al suroeste limitado por la Falla Chocontá – Pericos, presenta una morfología suave y ondulada con colinas poco pronunciadas²². Esta formación se presenta como una secuencia en la que predominan las lodolitas, lutitas y arcillolitas, dispuestas en capas gruesas a muy gruesas intercaladas con areniscas de grano medio, fino y muy fino en capas muy gruesas, pobremente seleccionadas y subredondeadas, inmaduras y bien cementadas y esporádicas capas muy delgadas de liditas. El espesor de la Formación Chipaque varía entre 550 metros y 1.000 metros de acuerdo a McLaughlin y Arce (1972)²³. A partir de los resultados obtenidos en la prospección geofísica se establecieron dos rangos de resistividad para la Formación Chipaque, el primer rango con valores entre 3 y 20 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de lodolitas con intercalaciones delgadas de areniscas y un segundo rango con valores de resistividad con valores entre 650 y 857 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de areniscas compactas, con intercalaciones de lodolitas. De acuerdo a sus características litológicas y los resultados de la prospección geofísica, la Formación Chipaque podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuicludo (medio de muy baja permeabilidad), con un potencial hidrogeológico muy bajo y representa la unidad confinante de las unidades hidrogeológicas localizadas en el área de estudio.

4.1.3.2. Formación Guaduas

La Formación Guaduas aflora al este del área de estudio bordeando la Falla de Suralá, al oeste bordeando la Falla Chocontá – Pericos, al norte alrededor del eje del Anticlinal de Guatavita y al noroeste formando el núcleo del Sinclinal El Santuario; morfológicamente está conformada por un valle con colinas de pendientes muy suaves²⁴. Esta formación está compuesta por capas medias de arcillolitas con laminación plano – paralela, cuarzoareniscas de grano fino a grueso dispuestas en capas muy gruesas a delgadas, capas medias a gruesas de limolitas, capas muy gruesas de arenisca arcillosa de grano fino, deleznable. En la plancha 228 Bogotá Noreste se reporta un espesor de 700 metros determinados a partir de perfil geológico²⁵. A partir de los resultados obtenidos en la prospección geofísica

²² Ibid. p. 51

²³ MCLAUGHLIN, D. H., y ARCE, M. Geology of the Zipaquirá area (zone IV), Cordillera Oriental, Colombia. Informe preliminar No.109, 336 pág. Sogamoso: INGEOMINAS., 1972, Citado por CORREDOR y TERRAZA. Op. Cit., p. 55.

²⁴ CORREDOR y TERRAZA. Op. Cit., p. 67.

²⁵ Ibid. p. 69

se establecieron cinco rangos de resistividad, el primer rango con valores entre 0.5 y 15 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de lodolitas, un segundo rango con valores entre 19 y 22 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de lodolitas con intercalaciones delgadas de areniscas, un tercer rango con valores entre 38 y 86 Ohm.m, asociado litológicamente a lodolitas intercaladas con areniscas, un cuarto rango con valores entre 110 y 187 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de areniscas fracturadas saturadas, con intercalaciones delgadas de lodolitas y finalmente, un quinto rango de valores entre 1.934 y 2.325 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de areniscas compactas. A partir de los resultados de los SEV_00, SEV_11, SEV_14 y SEV_15 localizados sobre esta formación, se estimó un espesor que varía entre 37 y 111 metros. De acuerdo a sus características litológicas y los resultados de la prospección geofísica, la Formación Guaduas podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuitardo (medio de baja permeabilidad), con un potencial hidrogeológico bajo; sin embargo, esta unidad puede almacenar y transmitir agua subterránea a partir de las capas de areniscas fracturadas que constituyen acuíferos de baja productividad.

4.1.3.3. Formación Bogotá

La Formación Bogotá aflora al noreste del área de estudio bordeando los flancos del Sinclinal de Sisga, al oeste y suroeste cerca de la Falla Chocontá – Pericos, presenta una morfología suave de colinas con bajas pendientes²⁶. Esta formación se presenta en capas muy gruesas de arcillolitas con intercalaciones esporádicas de intervalos de arenisca cuarzosa de grano fino a muy grueso dispuestas en capas medias a gruesas. En la plancha 228 Bogotá – Noreste se reporta un espesor de al menos 900 metros²⁷. Juliver (1963)²⁸ reporta en los Sinclinales de Tunjuelo, Bogotá - Cajicá - Chequa, Teusacá, Sesquilé y Siecha - Sisga un espesor variable entre 800 y 2.000 metros. A partir de los resultados obtenidos en la prospección geofísica se establecieron tres rangos de resistividad, un primer rango con valores entre 92 y 194 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de areniscas saturadas, con intercalaciones delgadas de arcillolitas, un segundo rango con valores entre 22 y 73 Ohm.m, asociado litológicamente a arcillolitas intercaladas con arenisca y finalmente, un tercer rango con valores entre 1 y 13 Ohm.m, asociado litológicamente a capas gruesas de arcillolitas con intercalaciones delgadas de areniscas. A partir de los resultados de los SEV_7; SEV_8, SEV_55 localizados sobre la Formación Bogotá y SEV_1, SEV_2, SEV_4, SEV_5, SEV_6, SEV_25,

²⁶ Ibid. p. 74

²⁷ Ibid. p. 75

²⁸ JULIVERT, M. Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. En: Boletín de Geología. 1963. vol.13, no. 1.

SEV_45 localizados sobre los Depósitos Aluviales, los Depósitos Coluviales y la Formación Tiltatá, se estimó un espesor que varía entre 90 y 164 metros para la Formación Bogotá. De acuerdo a sus características litológicas y los resultados de la prospección geofísica, la Formación Bogotá podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuitardo (medio de baja permeabilidad), con un potencial hidrogeológico bajo; sin embargo, esta unidad puede almacenar y transmitir agua subterránea a partir de las capas de areniscas que constituyen acuíferos de baja productividad.

4.1.3.4. Depósitos Cuaternarios Fluvioglaciares y Coluviales

Los Depósitos Fluvioglaciares y Coluviales se encuentran distribuidos en la parte sur y suroeste cerca de la Falla El Chachal y la Falla Chocontá – Pericos; estos depósitos presentan varias geoformas: superficies aplanadas, valles en “u” y morrenas laterales²⁹, se caracterizan por presentar litologías de gravas y arenas de grano fino, no consolidados, las gravas son granosoportadas, envueltos en una matriz arenosa y bloques angulares a subangulares de diferentes tamaños de grano, clasto soportados y con matriz arenosa o arcillosa. Al oriente del río Tunjuelo los Depósitos Fluvioglaciares presentan un espesor que varía de 15 a 40 m³⁰. En Buenavista y Chisacá los Depósitos Coluviales presentan un espesor variable entre 20 y 70 m³¹. A partir de los resultados obtenidos en la prospección geofísica se estableció un valor de resistividad igual a 490 Ohm.m para los Depósitos Coluviales asociado litológicamente a bloques de diferentes tamaños con matriz areno – arcillosa. De acuerdo a sus características litológicas y los resultados de la prospección geofísica, los Depósitos Fluvioglaciares y Coluviales podrían clasificarse hidrogeológicamente como un acuitardo (medio de baja permeabilidad), con un potencial hidrogeológico muy bajo.

4.2. HIDROESTRATIGRAFÍA

A partir de las características litológicas, geofísicas y estructurales de las rocas y sedimentos que conforman el área de estudio, se identificaron 11 unidades hidroestratigráficas correlacionales con las unidades hidrogeológicas descritas anteriormente, las cuales se agrupan en tres complejos hidrogeológicos, como se muestra en la imagen 2.





²⁹ MONTOYA, D., y REYES, G. Geología de la plancha 209 Zipaquirá. Bogotá: INGEOMINAS., 2003.

³⁰ EAAB. Estudio de factibilidad para el aprovechamiento adicional de la Cuenca alta del río Tunjuelo. Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá., 1989.

³¹ Ibid. p.

Imagen 2. Columna hidroestratigráfica del área de estudio.

COMPLEJOS HIDROGEO-LOGICOS	UNIDAD HIDROESTRATIGRÁFICA / HIDROGEOLOGICA	LITOLOGÍA PREDOMINANTE	
COMPLEJO NEÓGENO-CUATERNARIO	Depósitos Coluviales y Fluvioglaciares	Depósitos areno-arcillosos	
	Depósitos Aluviales y de Terrazas Altas	Depósitos aluviales arenosos	
	Fm. Tiltá	Depósitos arenosos con intercalaciones de arcillas	
COMPLEJO PALEÓGENO	Fm. La Regadera	Cuarzoareniscas intercaladas con conglomerados y arcillolitas	
	Fm. Bogotá	Arcillolitas intercaladas con arenisca	
	Fm. Cacho	Cuarzoareniscas intercaladas con arcillolitas	
COMPLEJO CRETÁCICO	Fm. Guaduas	Arcillolitas intercaladas con areniscas y limolitas	
	Gr. Guadalupe	Fm. Arenisca de Labor y Tierna	Cuarzoareniscas
		Fm. Plaeners	Liditas, lodolitas y arcillolitas intercaladas con cuarzoareniscas
		Fm. Arenisca Dura	Cuarzoareniscas
	Fm. Chipaque	Lodolitas, lutitas y arcillolitas	

LEYENDA HIDROGEOLOGICA			
	Acuífero con porosidad primaria		Acuífero con porosidad primaria y secundaria
	Acuitardo		Acuicludo

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

4.3. COMPLEJOS HIDROGEOLOGICOS

4.3.1. Complejo Cretácico

El Complejo Cretácico está conformado por rocas sedimentarias del Cretácico Superior, del cual hacen parte la Formación Chipaque, el Grupo Guadalupe

(Formación Arenisca Dura, Formación Plaeners y Formación Labor y Tierna) y la Formación Guaduas.

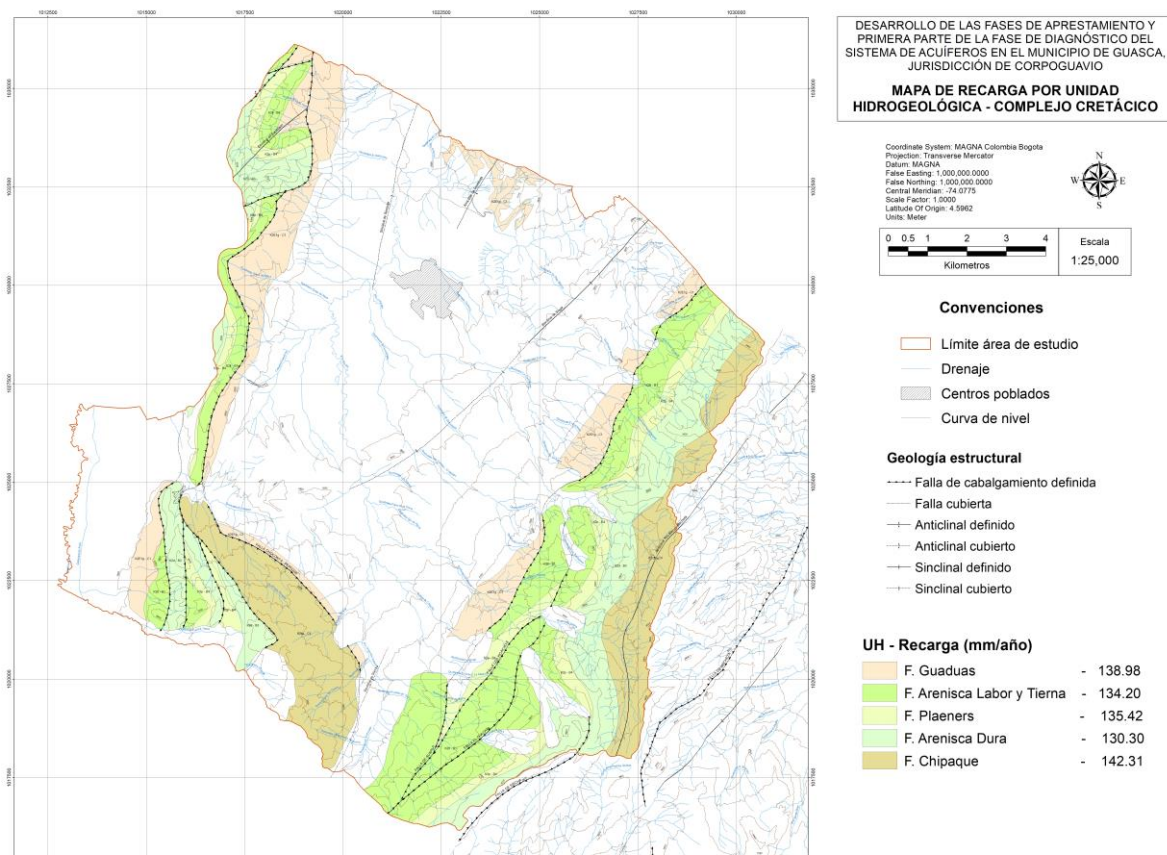
4.3.1.1. Generalidades

Hacia la base de este complejo se encuentra la Formación Chipaque, la cual se caracteriza por un predominio de materiales finos de muy baja permeabilidad y se comporta como un acuicludo representado el límite inferior confinante del Complejo Cretácico.

Suprayaciendo la Formación Chipaque se encuentra el Grupo Guadalupe, constituido principalmente por cuarzoareniscas que alternan con arcillolitas, limolitas, lodolitas y liditas. El nivel superior del grupo Guadalupe, representado por la Formación Arenisca de Labor y Tierna, y el nivel inferior, representado por la Formación Arenisca Dura, corresponden a niveles donde predominan las areniscas y son las unidades con mayor potencial para la acumulación y transmisión de agua subterránea. En el caso de la Formación Arenisca Dura, las areniscas son de tamaño de grano fino, compactas y masivas; razón por la cual su porosidad primaria no es tan significativa en comparación con su porosidad secundaria, la cual es mayor debido al grado de fracturamiento de las rocas, por consiguiente, esta unidad podría clasificarse como acuífero con flujo esencialmente a través de fracturas. La Formación Arenisca de Labor y Tierna presenta una porosidad primaria mayor debido a que estas rocas poseen una granulometría variada de grano muy fino a medio haciéndose gruesa hacia el tope de la unidad, los granos son redondeados a subangulares con una buena selección, esta unidad se encuentra afectada por fracturas de diferente orden, lo que aumenta su capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea, por lo tanto podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero de doble porosidad (flujo intergranular y a través de fracturas) de tipo multicapa. Adicionalmente se encuentra la Formación Plaeners, representando el nivel intermedio del Grupo Guadalupe, la cual está conformada por liditas, arcillolitas, limolitas y cuarzoareniscas, donde las capas con mayor potencial para almacenar y transmitir agua subterránea se restringen a los niveles de areniscas y liditas fracturadas, esta unidad se comporta como un acuífero con flujo esencialmente a través de fracturas.

Finalmente, suprayaciendo al Grupo Guadalupe, se encuentra la Formación Guaduas, constituida predominantemente por lodolitas y arcillolitas, se presentan intercalaciones de areniscas así como limolitas y areniscas arcillosas, los niveles saturados corresponden a capas de areniscas fracturadas que pueden almacenar y transmitir agua subterránea, razón por cual se considera hidrogeológicamente como un acuitardo; sin embargo, esta unidad puede almacenar y transmitir agua subterránea a partir de las capas de areniscas fracturadas que constituyen acuíferos de baja productividad

Imagen 3. Mapa de recarga por unidad hidrogeológica – Complejo Cretácico



Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

La descarga natural de las aguas subterráneas puede darse a través de manantiales. Aunque en el inventario de puntos de agua no se reportaron manantiales sobre el Complejo Cretácico, se podría presumir la existencia de zonas de descarga de agua subterráneas en este complejo que no han sido inventariados. Por otra parte, existen descargas artificiales por medio de pozos de captación de aguas subterráneas. En la vereda Santa Lucía existen dos pozos activos con profundidades de 150 metros cada uno, localizados sobre las formaciones Arenisca de Labor y Tierna y Guaduas con niveles estáticos de 26,5 y 62 metros, respectivamente. El pozo localizado sobre la Formación Arenisca de Labor y Tierna aporta un caudal aproximado de 2 l/s y su uso es ganadero.

4.3.1.3. Evaluación hidráulica

La evaluación hidráulica del Complejo Cretácico se realizó mediante dos pruebas de bombeo a caudal constante, una en época de lluvia 2017 y la otra, en época de estiaje 2017 al pozo Finca Santa Lucía localizado sobre la Formación Arenisca de

Labor y Tierna, donde se estimaron los parámetros hidráulicos que se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros hidráulicos en las unidades del Complejo Cretácico.

Unidad	Pozo	Época de realización de la prueba de bombeo	Profundidad del pozo (m)	Caudal (l/s)	Transmisividad (m ² /día)	Capacidad específica (l/s/m)
Formación Arenisca de Labor y Tierna	Finca Santa Lucia	Lluvia 2017	150	2	9,64	0,13
		Estiaje 2017			10,27	0,14

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

Para la Formación Arenisca de Labor y Tierna la transmisividad se encuentra en un rango entre 9,64 y 10,27 m²/día y la capacidad específica en un rango entre 0,13 y 0,14 l/s/m. El Grupo Guadalupe se considera de gran interés hidrogeológico para el área de estudio y constituye acuíferos con flujo esencialmente a través de fractura para la Formación Arenisca Dura y Formación Plaeneres y un acuífero de doble porosidad (flujo intergranular y a través de fracturas) de tipo multicapa para la Formación Labor y Tierna.

En el área de la Sabana de Bogotá el Grupo Guadalupe se considera de gran importancia hidrogeológica ya que constituye un acuífero regional de carácter confinado, los valores de transmisividad varían entre 5 y 600 m²/día, la conductividad hidráulica varía entre 0,02 y 2,0 m/día, la capacidad específica entre 0,05 y 5,5 l/s/m y los coeficientes de almacenamiento más comunes se encuentran en el rango entre 1x10⁻⁴ y 1x10⁻⁷; el rendimiento individual de los pozos en promedio es de 20 – 25 l/s, aunque pueden presentarse caudales bajos (menos de 2 l/s) posiblemente a las limitaciones laterales por la densidad de fracturamiento³².

Adicionalmente, en la Sabana de Bogotá para la Formación Guaduas los valores de transmisividad varían entre 4 y 5 m²/día, la capacidad específica varía entre 0,75 y 0,24 l/s/m, el rendimiento de los pozos es de 1,2 - 0,75 l/s y para la Formación Chipaque, la capacidad específica es de 0,004 y el rendimiento de los pozos es de 1,2 l/s³³.

³² BERMOUDES, O., y VELANDIA, F. Op. Cit., p. 50.

³³ INGEOMINAS – DIVISIÓN HIDROGEOLOGÍA. Mapa hidrogeológico – Sector Sisga, Tibitó y Embalse de Tominé: Geominas., 1992.

4.3.1.4. Caracterización hidrogeoquímica

La caracterización hidrogeoquímica para el Complejo Cretácico se hizo a partir de tres puntos de agua ubicados sobre la Formación Labor y Tierna y Formación Guaduas, a los cuales se les realizó el análisis de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos para época de lluvia y de estiaje. La tabla 4 muestra los puntos de agua utilizadas para el análisis.

Tabla 4. Puntos de agua ubicados sobre el Complejo Cretácico, para la caracterización hidrogeoquímica.

Número	Nombre del punto	Tipo	Coordenadas		Prof. (m)	Nivel (m)
1	Finca Santa Lucía	Pozo	N: 1.026.575	E: 1.016.624	150	62
2	Arca de los Sueños	Aljibe	N: 1.027.195	E: 1.016.721	Entre 5 y 9	3,85
3	Finca Retiro	Pozo	N: 1.026.413	E:1.016.679	150	26,5

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

Los resultados obtenidos, se procesaron para realizar la caracterización hidrogeoquímica de las muestras de agua subterránea, para las unidades del Complejo Cretácico, este procesamiento se hizo a partir de cálculos estadísticos descriptivos y el uso de diagramas hidrogeoquímicos (diagramas de Piper, Stiff y Schoeller). En la tabla 5 se presentan los resultados de las mediciones realizadas en campo sobre los tres puntos de agua subterránea localizados en el Complejo Cretácico.

Tabla 5. Resultados de las mediciones realizadas en campo, en los puntos de agua subterránea del Complejo Cretácico.

Parámetro	Aljibe Arca de los Sueños		Pozo Finca El Retiro		Pozo Finca Santa Lucia	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
pH	5,10	5,95	6,00	6,45	5,70	6,30
Temperatura (°C)	16,70	19,55	19,96	18,50	17,70	17,45
Conductividad eléctrica (µS/cm)	0,90	640,00	135,00	215,00	6,18	260,00

Parámetro	Aljibe Arca de los Sueños		Pozo Finca El Retiro		Pozo Finca Santa Lucia	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
Oxígeno disuelto (mgO ₂ /L)	4,11	3,84	4,40	4,15	3,56	3,20
Oxígeno disuelto (%)	59,25	54,05	68,25	67,75	43,84	38,75
Turbiedad (UNT)	4,24	2,86	3,90	4,72	5,15	5,52

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

Los resultados de las mediciones en campo para el parámetro del pH muestran que las aguas subterráneas del Complejo Cretácico son ácidas, ya que el pH oscila entre 5,10 y 6,00 en época de lluvia y 5,95 y 6,45 en época de estiaje. El grado de acidez en este tipo de agua se debe posiblemente a procesos de infiltración del agua lluvia, la interacción entre los componentes por donde circula el agua y a las características ácidas del suelo del área de estudio. La conductividad eléctrica para el Complejo Cretácico muestra un valor máximo de 640 μ S/cm para el Aljibe Arca de los Sueños, el cual puede estar asociado a un aporte importante de minerales que pueden darse por la presencia de areniscas, arcillolitas y lodolitas. Las aguas de Complejo Cretácico corresponden a agua dulce.

Adicionalmente, se realizó la caracterización de los puntos de agua subterránea ubicados sobre el Complejo Cretácico a partir de los análisis de laboratorio. En la tabla 6 muestra los resultados de los tres puntos analizados.

Tabla 6. Resultados de las mediciones en el laboratorio para los puntos de agua subterránea del Complejo Cretácico

Parámetro	Aljibe Arca de los Sueños		Pozo Finca El Retiro		Pozo Finca Santa Lucia	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	35,00	5,10	35,60	45,70	39,20	37,50
Nitratos (mgNO ₃ -/L)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Nitritos (mgNO ₂ -/L)	<0,05	0,05	<0,05	0,05	<0,05	0,05
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99

Parámetro	Aljibe Arca de los Sueños		Pozo Finca El Retiro		Pozo Finca Santa Lucia	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
Ortосfosfatos (mgPO ₄ /L)	<0,111	0,11	<0,111	0,11	<0,111	0,28
Sólidos en solución (mg/L)	54,00	71,00	63,00	70,00	76,00	80,00
Sólidos totales (mg/L)	56,00	92,00	66,00	118,00	108,00	124,00
Bicarbonatos (mg/CaCO ₃)	34,95	44,49	35,59	45,71	39,24	37,48
Cloruros (mgCl/L)	1,12	1,12	2,68	3,72	2,88	3,22
Sulfatos (mgSO ₄ /L)	4,61	5,12	9,08	8,71	15,73	13,88
Hierro (mgMetal/L)	0,40	0,15	6,11	9,70	22,20	2,571
Calcio (mgMetal/L)	7,62	9,21	11,50	16,91	15,50	15,12
Magnesio (mgMetal/L)	3,63	2,625	4,10	4,64	2,89	3,10
Sodio (mgMetal/L)	15,30	4,32	15,80	11,02	3,36	3,42
Potasio (mgMetal/L)	1,31	1,1430	1,26	1,729	1,58	1,19
Arsénico (mgMetal/L)	<0,0045	0,0070	<0,0045	0,00	0,01	0,0045
Acidez (mgCaCO ₃ /L)	39,30	5,80	8,30	16,50	26,70	13,80
Coliformes totales (NMP/100 mL)	131.230,00	1.145	75,00	1,00	<1	115,30
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	<10	1,00	<10	1,00	<1,8	1,00

Parámetro	Aljibe Arca de los Sueños		Pozo Finca El Retiro		Pozo Finca Santa Lucia	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
Dureza (mg/L) CaCO ₃	33,97	33,81	45,60	61,35	50,63	50,54

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

De acuerdo a los valores de concentraciones de CaCO₃ en los puntos de agua subterránea, estas muestras se pueden clasificar por el parámetro de dureza en blandas, debido a la baja concentración de Magnesio y Calcio de las muestras, tanto en época de lluvia como en época de estiaje. La alcalinidad de un agua determina la capacidad para neutralizar ácidos, en la mayoría de las aguas naturales está producida por los iones carbonato y bicarbonato; para los parámetros de alcalinidad y bicarbonatos se evidencia que, en los puntos de agua subterránea del Complejo Cretácico, se presenta una baja concentración de estos iones.

Para los parámetros de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal de los puntos de agua subterránea para las épocas de lluvia y de estiaje, se puede determinar que presentan bajas concentraciones y que ninguno de los puntos del Complejo Cretácico supera los límites establecidos por normatividad colombiana. Las concentraciones de ortofosfatos en condiciones naturales para los puntos de agua subterránea son bajas, al igual que la calidad de sólidos en solución y los sólidos totales.

Los sulfatos proceden de la oxidación de sulfuros ampliamente distribuidos en las rocas sedimentarias, debido a la descomposición de sustancias orgánicas. Sin embargo, la disolución del yeso, la anhidrita y otros tipos de sulfatos dispersos, representa el aporte cuantitativamente más significativo de este ion en las aguas subterráneas. El contenido de sulfatos en las aguas subterráneas del Complejo Cretácico presenta en general concentraciones bajas para épocas de lluvia y estiaje, asociadas a valores normales de aguas dulces.

Las concentraciones de hierro en el agua están controlado por procesos de equilibrio químico como oxidación – reducción, precipitación y disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros. Las aguas con pH entre 6 y 8 pueden presentar concentraciones de hasta 50 mg/l. En los Pozos Finca El Retiro y Finca Santa Lucía presentaron valores que sobrepasan los límites establecidos en época de lluvia y de estiaje por la normatividad colombiana el cual es de 5 (Fe/L) para uso agrícola.

El calcio en las rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonato o de sulfato y el magnesio procede de la disolución de rocas carbonatadas, evaporitas y la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de aguas marinas. Los valores de calcio y magnesio en las aguas subterráneas del

Complejo Cretácico para la época de lluvia y de estiaje son bajos y se pueden asociar principalmente a los contenidos de estos elementos en las formaciones geológicas y el suelo. Las concentraciones de calcio y magnesio en estas aguas subterráneas se relacionan con aguas dulces naturales.

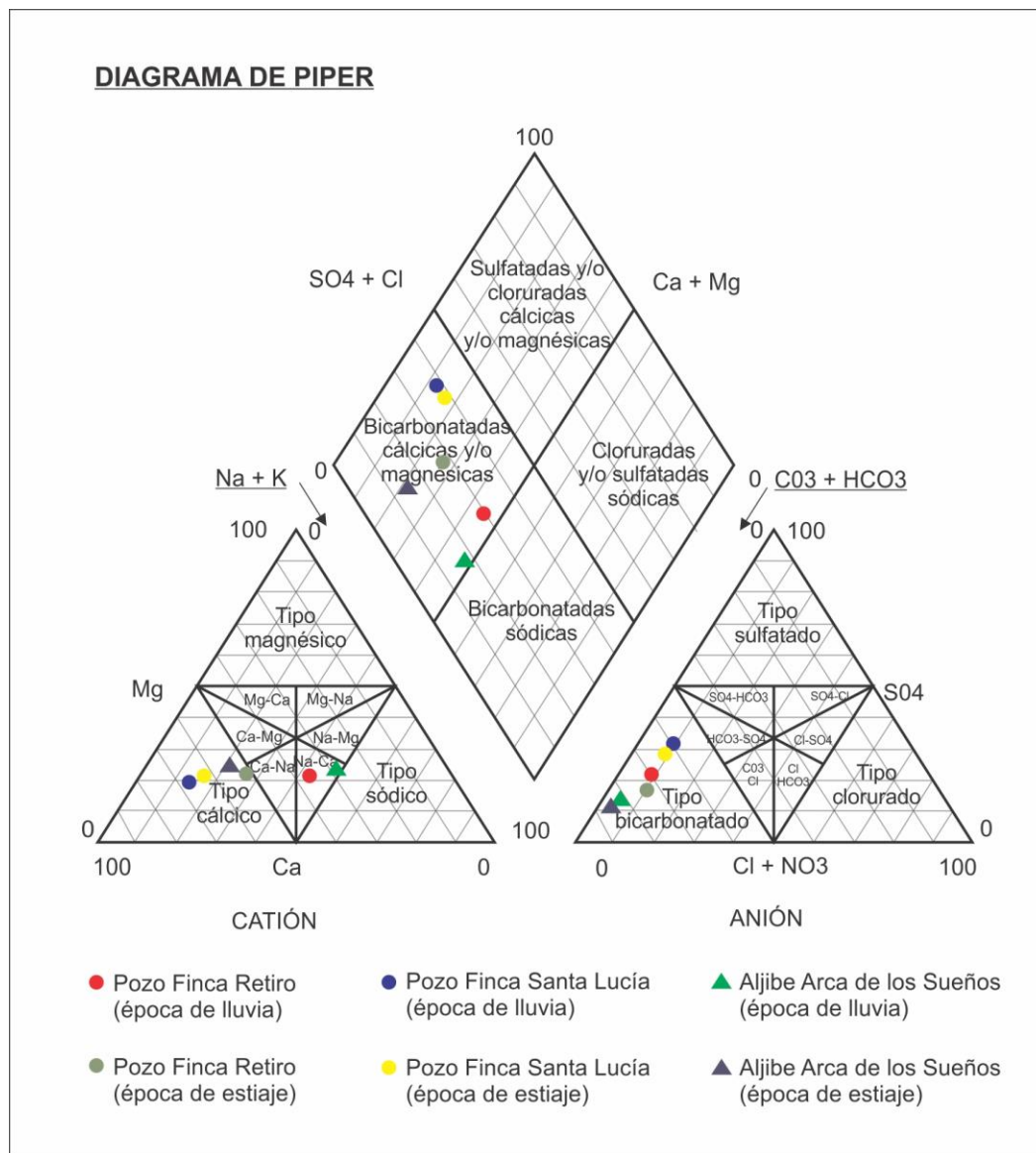
El potasio procede de la meteorización de feldspatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas. Para las concentraciones de potasio se evidenció que todos los valores de los puntos sobre el Complejo Cretácico para las épocas de lluvia y de estiaje son inferiores a 10 mg/L por lo que se encuentran en el rango admisible de acuerdo a la normatividad colombiana establecidos para uso agrícola.

Para los resultados obtenidos de coliformes fecales y totales, el Aljibe Arca de los Sueños mostró concentraciones altas las cuales se podrían asociar a la infiltración de microorganismos presentes en el suelo, este resultado es señal de posible contaminación y supera los valores admisibles para la destinación del recurso para el consumo humano, uso doméstico y uso pecuario.

Resultados del diagrama de Piper

En el diagrama de Piper se representa la composición de agua deducida a partir de aniones y cationes, las aguas geoquímicamente similares para el Complejo Cretácico se agrupan y clasifican en áreas bien definidas, como se muestra en la imagen 4.

Imagen 4. Diagrama de Piper para las muestras de agua subterránea del Complejo Cretácico.



Fuente: SYSYCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

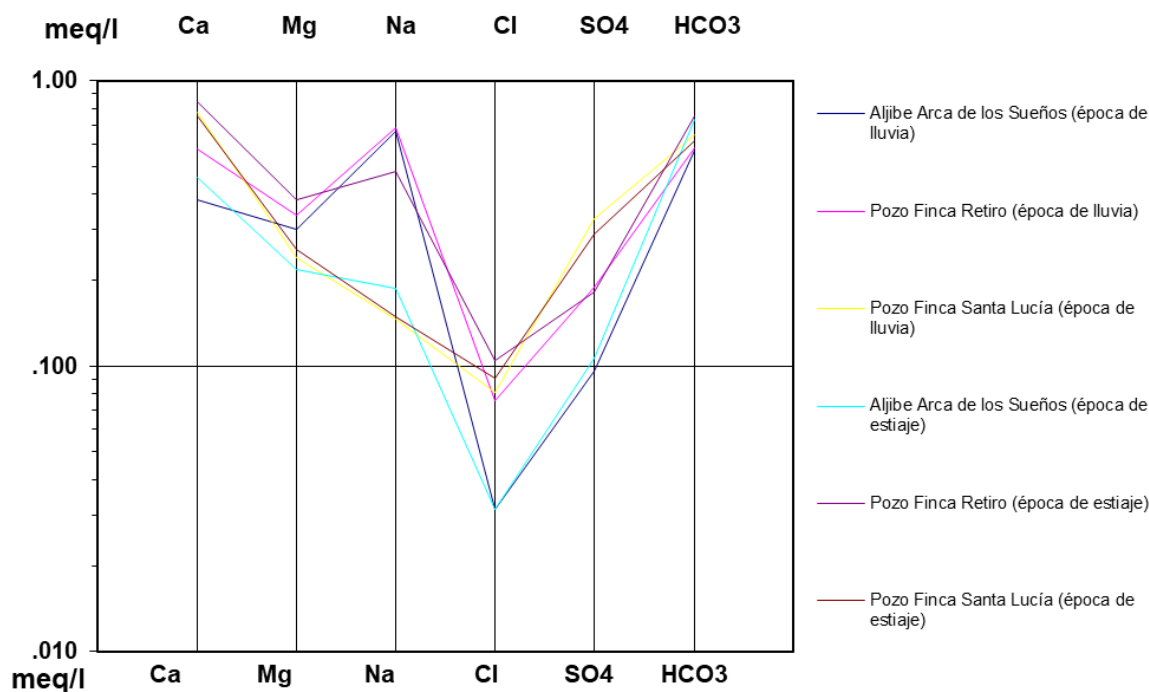
El diagrama de Piper muestra que el agua subterránea en el Aljibe Arca de los Sueños, el Pozo Finca Retiro y el Pozo Finca Santa Lucía muestran comportamiento hidroquímico homogéneo presentando aguas bicarbonatadas cálcicas-magnésicas para cada una de las muestras de agua subterráneas localizadas en el Complejo Cretácico.

Resultados del diagrama de Schöeller - Berkaloff

En el diagrama de Schöeller – Berkaloff se tiene en cuenta los valores absolutos de las concentraciones de cada ion. A partir de los resultados de la caracterización hidrogeoquímica en épocas de lluvia y estiaje se clasificaron las aguas subterráneas del Complejo Cretácico a partir de las concentraciones de Cl⁻, SO₄⁼, HCO₃⁻, como se muestra en la imagen 5.

Imagen 5. Diagrama de SCHÖELLER-BERKALOFF para los puntos de agua subterránea del Complejo Cretácico.

SCHÖELLER-BERKALOFF DIAGRAM



Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

Para la clasificación de los tipos de agua en épocas de lluvia y de estiaje para el Complejo Cretácico según Schöeller, el Aljibe Arca de los Sueños presenta agua clorurada normal, sulfatada normal e hipo bicarbonatado, esta anomalía en las concentraciones de bicarbonato se asocian probablemente a que estas aguas se encuentran más cerca de la superficie y pueden ser una posible mezcla entre agua de infiltración y agua proveniente de los acuíferos. Para los pozos Finca Santa Lucía y Finca Retiro se presentan valores normales de cloruro y sulfato, sin embargo, también presentan una anomalía en las concentraciones de bicarbonato, esta

anomalía se debe posiblemente a la formación donde se encuentra el agua almacenada, en el caso del Complejo Cretácico, las formaciones que se encuentran dentro de este complejo son pobres en calizas, dolomitas y silicatos, por tal razón el aporte de bicarbonato es bajo.

4.3.2. Complejo Paleógeno

El Complejo Paleógeno está conformado por rocas sedimentarias del Paleoceno y Eoceno, del cual hacen parte la Formación Cacho, Formación Bogotá y Formación La Regadera.

4.3.2.1. Generalidades

Suprayaciendo al Complejo Cretácico, se encuentra la Formación Cacho que corresponde a cuarzoareniscas de tamaño de grano fino a conglomerático, redondeadas a subredondeadas, moderadamente seleccionadas, deleznales, intercaladas con arcillolitas; esta unidad presenta buena porosidad primaria intergranular y secundaria por fracturamiento, por lo cual podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero de doble porosidad (flujo intergranular y a través de fracturas) con capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea.

Suprayaciendo a la Formación Cacho, se encuentra la Formación Bogotá, constituida por una secuencia de rocas predominantemente arcillosas de muy baja permeabilidad con intercalaciones esporádicas de areniscas, esta unidad podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuitardo (medio de baja permeabilidad); sin embargo, puede almacenar y transmitir agua subterránea a partir de las capas de areniscas que constituyen acuíferos de baja productividad confinados a semiconfinados por las capas arcillosas. En general la Formación Bogotá representa el límite superior confinante a semiconfinante de la Formación Cacho.

Por último, en el Complejo Paleógeno, tenemos la Formación La Regadera la cual suprayace a la Formación Bogotá y está constituida por cuarzoareniscas poco consolidadas, muy bien calibradas y redondeadas, conglomerados y arcillolitas con intercalaciones de areniscas; esta unidad presenta una buena porosidad primaria y podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero.

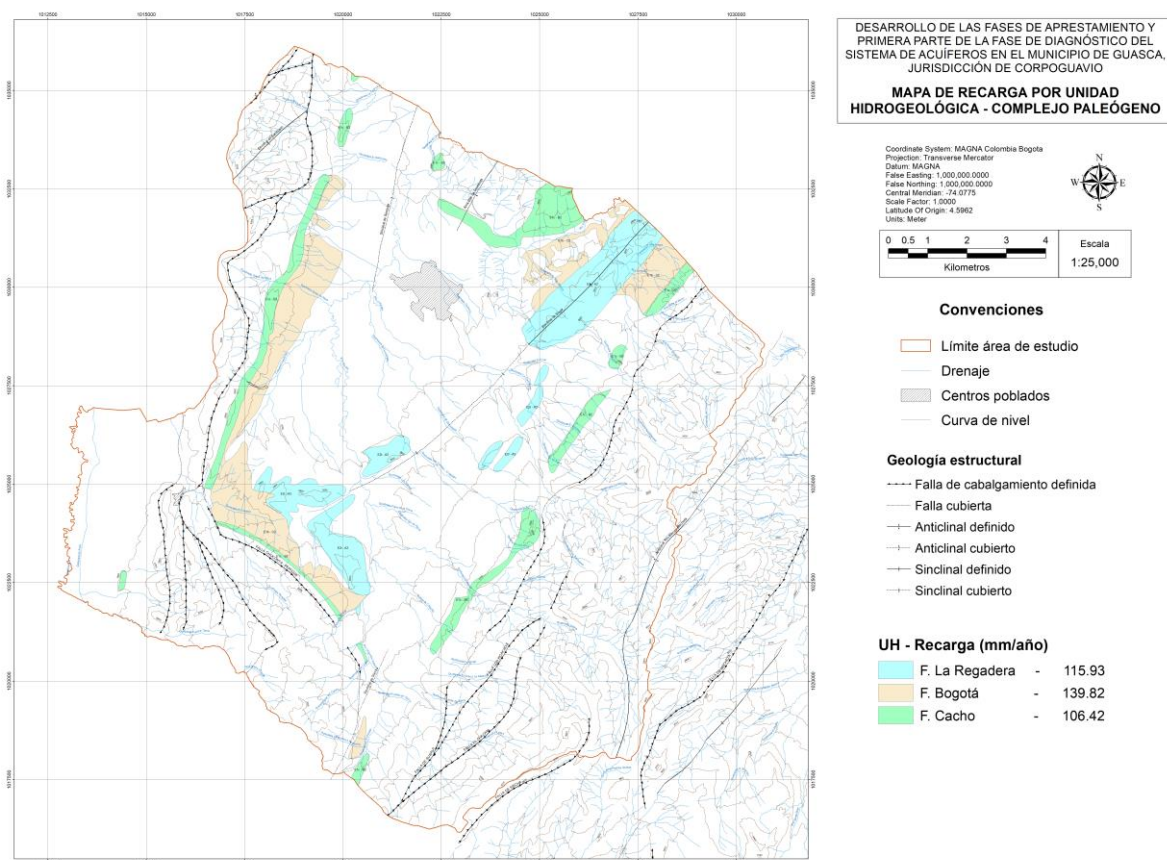
4.3.2.2. Áreas de recarga y descarga

Los acuíferos de Complejo Paleógeno tienen como principal fuente de recarga las precipitaciones; las cuales alimentan los acuíferos de la Formación Cacho y la Formación La Regadera por procesos de infiltración, en los lugares donde afloran estas unidades. Los niveles arcillosos de baja permeabilidad de la Formación

Bogotá dificultan y restringen la infiltración a valores mínimos, la cual ocurre por lento goteo a través de sus capas confinantes, generando flujos subsuperficiales que pueden ser absorbidos por los niveles arenosos de esta formación o en partes más bajas por depósitos o rocas de mayor permeabilidad.

A partir del balance hídrico de la humedad del suelo, se calculó la recarga potencial para las unidades acuíferas del Complejo Paleógeno. Para la Formación Cacho, que cubre un área de 7,53 Km², se obtuvo un valor de recarga de 106,42 mm/año, la Formación Bogotá con un área de 10,88 Km² y una recarga de 139,82 mm/año, y la Formación La Regadera con un área de 9,11 Km² y una recarga de 115,93 mm/año, como se observa en la imagen 6.

Imagen 6. Mapa de recarga por unidad hidrogeológica – Complejo Paleógeno.



Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

La descarga natural de las aguas subterráneas puede darse a través de los manantiales. Durante el inventario de puntos de agua, se reconocieron dos manantiales, ubicados sobre la Formación La Regadera en la vereda Santa Bárbara y Corrales - Guatavita. Por otra parte, existe descarga artificial por medio de los pozos de captación de aguas subterráneas localizados en la Finca Santa Rita y el Predio El Cucharó Finca, ambos ubicados sobre la Formación La Regadera.

4.3.2.3. Evaluación hidráulica

La evaluación hidráulica del Complejo Paleógeno se realizó mediante cuatro pruebas de bombeo a caudal constante a los pozos Santa Rita y El Cucharó en época de lluvia y de estiaje, localizados sobre la Formación Regadera y el pozo Vereda Las Flores, localizado sobre la Formación Cacho, donde se estimaron los parámetros hidráulicos que se presentan en la tabla 7.

Tabla 7. Parámetros hidráulicos en las unidades del Complejo Paleógeno

Unidad	Pozo	Época de realización de la prueba de bombeo	Profundidad de los pozos(m)	Caudal (l/s)	Transmisividad (m ² /día)	Capacidad específica (l/s/m)
Formación Cacho	Vereda las Flores		80	0.1	0,1	0.006
Formación La Regadera	Santa Rita	Lluvia	150	1	0,8	0,02
		Estiaje			0,59	0,019
Formación La Regadera	El Cucharó	Lluvia	160	1	3,3	0,025
		Estiaje			2,76	

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

Para la Formación La Regadera los valores de la transmisividad varían entre 0,59 y 3,3 m²/día, la capacidad específica es de 0,019 – 0,025 l/s/m, los cuales constituyen acuíferos confinados o libres asociados a capas de areniscas y/o conglomerados friables; presentando un potencial hidrogeológico medio para el área de estudio. En la Sabana de Bogotá la Formación La Regadera presenta poca importancia hidrogeológica debido a su limitada extensión local, los valores de transmisividad

varían entre 4 y 5 m²/día, la capacidad específica entre 0,75 y 0,24 m/día y los coeficientes de almacenamiento se encuentran en el rango de 1,2 a 0,75³⁴.

Por otra parte, la Formación Cacho en el área de estudio presenta una transmisividad de 0,1 m²/día y la capacidad específica es de 0,006 l/s/m, según la prueba de bombeo realizada en el pozo Vereda Las Flores. Estos resultados contrarían los determinados en la información secundaria, como los que exhiben INGEOMINAS³⁵ y BERMOUDES y VELANDIA³⁶ donde se reportan unos valores de transmisividades de 200 m²/día y en algunos casos llega hasta 480 m²/día, la conductividad hidráulica varía de 0,3 a 3 m/día, un coeficiente de almacenamiento de $5,1 \times 10^{-3}$, con una capacidad específica de 0,6 l/s/m y la producción de los pozos va desde 0,5 hasta 20 l/s. En la Sabana de Bogotá para la Formación Bogotá los valores de transmisividad son de 2 m²/día, la capacidad específica varía entre 0,07 y 0,005 l/s/m y el rendimiento de los pozos es de 2,4 - 0,06 l/s³⁷.

4.3.2.4. Caracterización hidrogeoquímica

La caracterización hidrogeoquímica para el Complejo Paleógeno se hizo a partir de dos puntos de agua ubicados sobre la Formación Regadera, a los cuales se les realizó un análisis de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos para época de lluvia y de estiaje. La tabla 8 muestra los puntos de agua utilizados para el análisis.

Tabla 8. Puntos de agua ubicados sobre el Complejo Paleógeno para la caracterización hidrogeoquímica.

Número	Nombre del punto	Tipo	Coordenadas		Profundidad (m)	Nivel (m)
1	Finca Santa Rita	Pozo	N: 1024392	E: 1019035	150	3
2	Predio el Cucharó	Pozo	N: 1024714	E: 1018660	160	82

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

Los resultados obtenidos, se procesaron para realizar la caracterización hidrogeoquímica de las muestras de agua subterránea, para las unidades del Complejo Paleógeno, este procesamiento se hizo a partir de cálculos estadísticos

³⁴ INGEOMINAS Op. Cit.

³⁵ Ibid.

³⁶ BERMOUDES, O., y VELANDIA, F. Op. Cit., p. 49.

³⁷ INGEOMINAS Op. Cit.

descriptivos y el uso de diagramas hidrogeoquímicos (diagramas de Piper, Stiff y Schoeller). En la tabla 9 se presentan los resultados de las mediciones realizadas en campo para épocas de lluvia y estiaje sobre los dos puntos de agua subterránea para el Complejo Paleógeno.

Tabla 9. Resultados de las mediciones realizadas en campo en épocas de lluvia y estiaje para los puntos de agua subterránea del Complejo Paleógeno.

Parámetro	Pozo Finca Santa Rita		Pozo Predio el Cucharó	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
pH	6,10	6,30	5,20	5,55
Temperatura (°C)	19,60	16,70	17,40	18,20
Conductividad Eléctrica (µS/cm)	115,00	130,00	0,80	160,00
Oxígeno Disuelto (mgO ₂ /L)	3,38	3,18	5,11	4,93
Oxígeno Disuelto (%)	52,05	50,70	76,00	72,40
Turbiedad (UNT)	134,00	6,85	32,61	21,78

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

Los resultados de las mediciones en campo para el parámetro del pH muestran que las aguas subterráneas del Complejo Paleógeno son ácidas ya que el pH oscila entre 5,20 y 6,30 para las épocas de lluvia y de estiaje. El grado de acidez en este tipo de agua se debe posiblemente a procesos de infiltración de la lluvia, la interacción entre los componentes por donde circula el agua y a las características ácidas del suelo del área de estudio.

El parámetro de la conductividad eléctrica para el Complejo Paleógeno muestra un valor máximo de 160,00 µS/cm para el Pozo Predio el Cucharó, el cual puede estar asociado a un aporte importante de minerales que pueden darse por la presencia de areniscas, arcillolitas y lodolitas típicas de la Formación Regadera. Las aguas de Complejo Paleógeno corresponden a aguas dulces.

Adicionalmente, se realizó la caracterización de los puntos de agua subterránea ubicados sobre el Complejo Paleógeno a partir de los análisis de laboratorio. En la tabla 10 muestra los resultados de los dos puntos analizados.

Tabla 10. Resultados de las mediciones de laboratorio para los dos puntos ubicados sobre el Complejo Paleógeno en las épocas de lluvia y de estiaje.

Parámetro	Pozo Finca Santa Rita		Pozo Predio el Cucharó	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	16,70	7,10	8,50	5,20
Nitratos (mgNO ₃ -/L)	23,20	0,61	0,69	0,87
Nitritos (mgNO ₂ -/L)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	0,99	0,99	0,99	0,99
Ortosfosfatos (mgPO ₄ /L)	<0,111	0,15	<0,111	0,23
Sólidos en solución (mg/L)	138,00	13,00	8,00	8,70
Sólidos totales (mg/L)	154,00	84,00	9,00	64,00
Bicarbonatos (mg/CaCO ₃)	16,72	7,15	8,53	4,98
Cloruros (mgCl/L)	1,12	1,12	2,97	1,54
Sulfatos (mgSO ₄ /L)	10,69	4,61	4,61	4,61
Hierro (mgMetal/L)	21,80	4,961	10,70	1,418
Calcio (mgMetal/L)	2,09	1,74	3,76	1,06
Magnesio (mgMetal/L)	0,96	0,869	0,42	0,331
Sodio (mgMetal/L)	2,12	1,61	5,01	2,665
Potasio (mgMetal/L)	1,61	0,81	0,89	1,34
Arsénico (mgMetal/L)	<0,0045	0,0050	<0,0045	0,0070
Acidez (mgCaCO ₃ /L)	9,50	10,40	6,30	5,00
Coliformes totales (NMP/100 mL)	2,00	8,60	2064,00	1,00
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	<1.8	2,00	10,00	1,00
Dureza (mg/L) CaCO ₃	9,18	7,91	11,13	4,01

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

De acuerdo a los valores de concentraciones de CaCO₃ en los puntos de agua subterránea para las épocas de lluvia y de estiaje, estas muestras se pueden clasificar por el parámetro de dureza en blandas, debido a la baja concentración de magnesio y calcio de las muestras. La alcalinidad de un agua determina la capacidad de neutralizar ácidos, en la mayoría de las aguas naturales está producida por los iones calcio y magnesio; para los parámetros de alcalinidad y bicarbonatos se evidencia que en los puntos de agua subterránea del Complejo Paleógeno en las épocas de lluvia y de estiaje, se presenta una baja concentración de estos iones.

Para los parámetros de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal de los puntos de agua subterránea, se puede determinar que estos puntos presentan bajas concentraciones y que ninguno de los puntos en época de lluvia y de estiaje del Complejo Paleógeno supera los límites establecidos por la normatividad colombiana para usos pecuarios. Las concentraciones de ortofosfatos en condiciones naturales para los puntos de agua subterránea son bajas, al igual que la cantidad de sólidos en solución y sólidos totales.

Los sulfatos proceden de la oxidación de sulfuros ampliamente distribuidos en las rocas sedimentarias debido a la descomposición de sustancias orgánicas. Sin embargo, la disolución del yeso, la anhidrita y otros tipos de sulfatos dispersos representa el aporte cuantitativamente más significativo de este ion en las aguas subterráneas. El contenido de sulfatos en las aguas subterráneas del Complejo Paleógeno para las épocas de lluvia y de estiaje presentaron en general concentraciones bajas, asociadas a los valores normales de aguas dulces.

Las concentraciones de hierro en el agua están controladas por procesos de equilibrio químico como oxidación – reducción, precipitación y disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros. Las aguas con pH entre 6 y 8 pueden presentar concentraciones de hasta 50 mg/l. Para el caso de los pozos Finca Santa Rita y Predio el Cucharo, en la época de lluvia se presentaron valores que sobrepasan los límites permitidos por la normatividad colombiana establecidos en 5 (mg/L) para uso agrícola.

Los valores de calcio y magnesio en las aguas subterráneas del Complejo Paleógeno para las épocas de lluvia y de estiaje son bajos y se pueden asociar principalmente a los contenidos de estos elementos en las formaciones geológicas y el suelo. Estas concentraciones en las aguas subterráneas se relacionan con aguas dulces naturales.

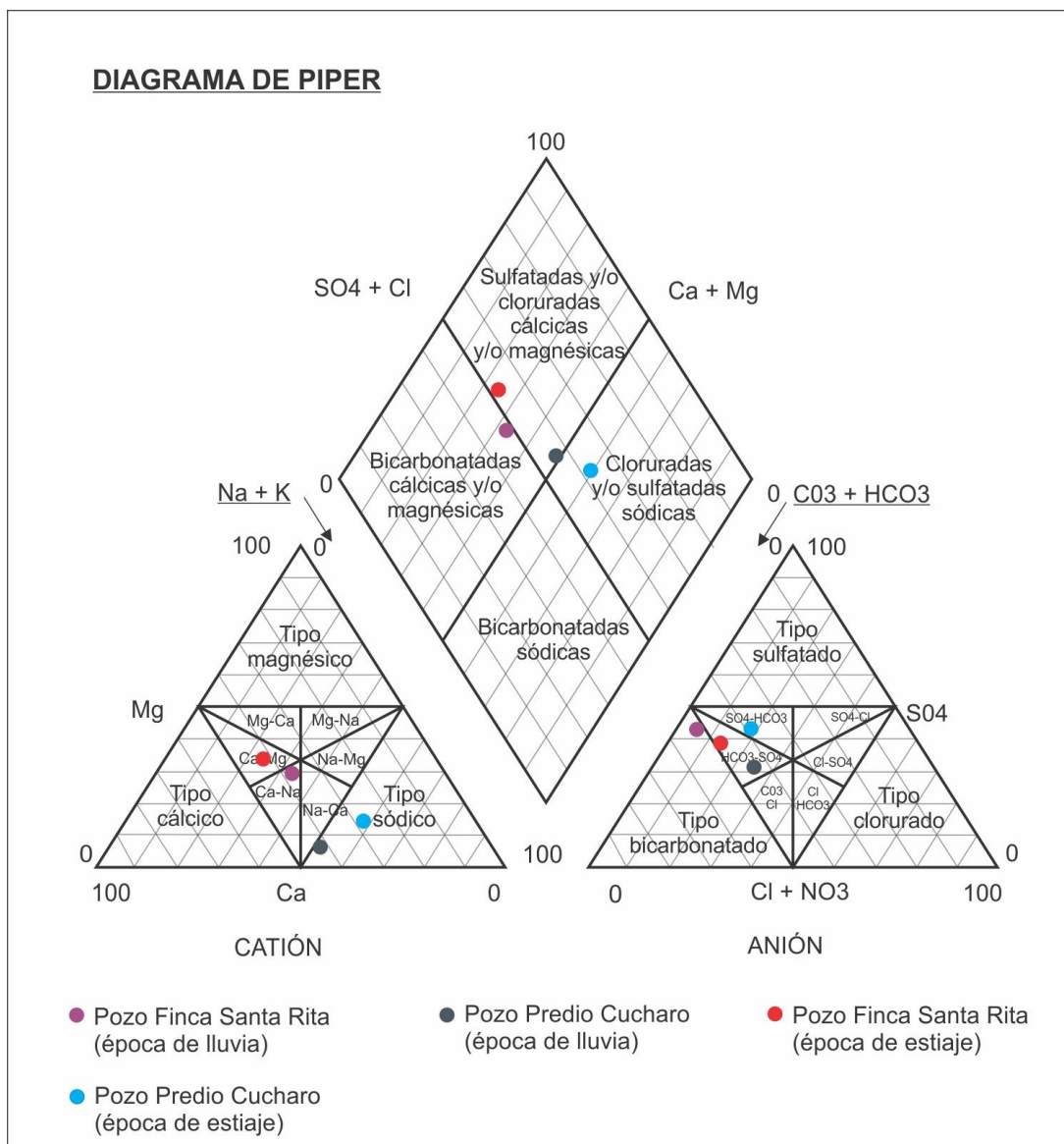
Las concentraciones de potasio en el agua subterránea por encima de 10 mg/L suele relacionarse en ocasiones, con indicios de contaminación por vertidos de aguas residuales, para las muestras de agua del Complejo Paleógeno en épocas de lluvia y de estiaje no sobrepasan este límite.

Para los resultados obtenidos de coliformes fecales y totales para el Pozo Predio el Cucharo en época de lluvia mostraron concentraciones altas las cuales se podrían asociar a la infiltración de microorganismos presentes en el suelo, este resultado es señal de posible contaminación y supera los valores admisibles para la destinación del recurso para el consumo humano, uso doméstico y uso pecuario.

Resultados del diagrama de Piper

En el diagrama de Piper se representa la composición de agua deducida a partir de aniones y cationes, las aguas geoquímicamente similares para el Complejo Paleógeno se agrupan y clasifican en áreas bien definidas en épocas de lluvia y de estiaje como se muestra en la imagen 7.

Imagen 7. Diagrama de Piper para las muestras de agua subterránea en época de lluvia y de estiaje del Complejo Paleógeno.



Fuente: SYSVOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

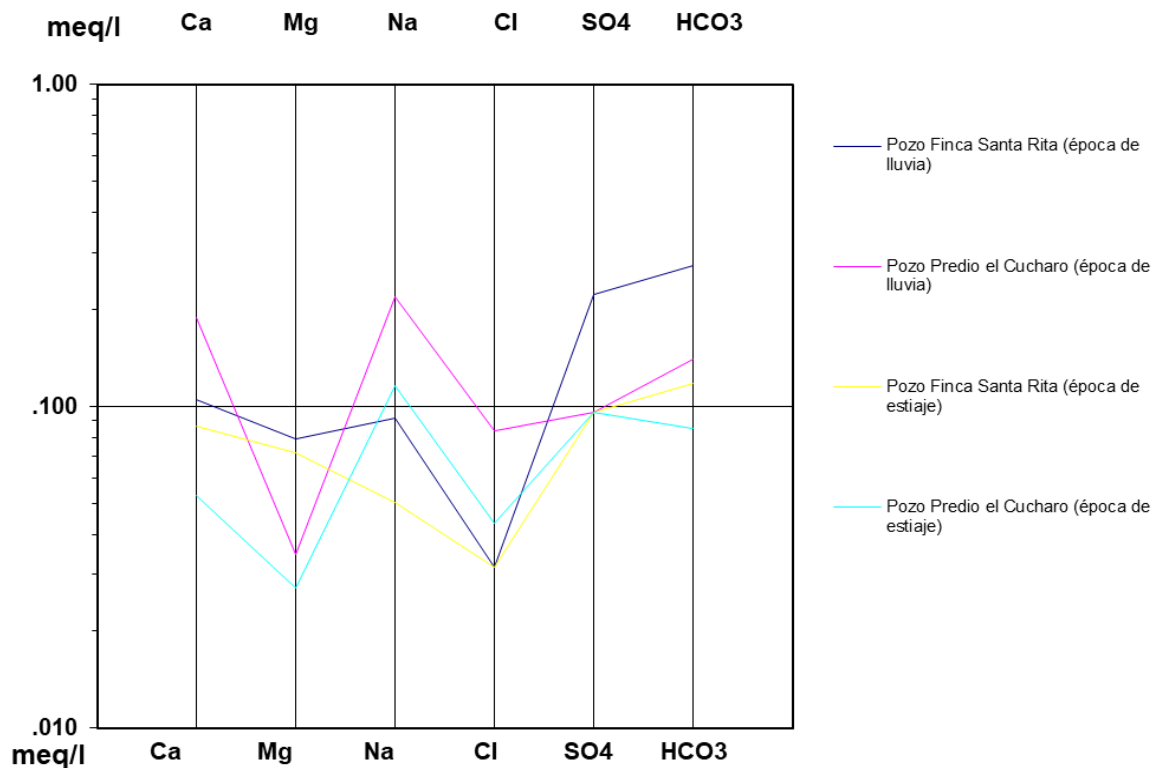
El diagrama de Piper muestra un comportamiento hidroquímica heterogéneo del agua subterránea asociada al Complejo Paleógeno, por una parte, el Pozo Finca Santa Rita presenta características de un agua bicarbonatada cálcica magnésica y/o sódica para las épocas de lluvia y de estiaje, por otra parte, para el Pozo Predio el Cucharó se presentan características de agua sulfatada y/o bicarbonatada sódica para las épocas de lluvia y de estiaje.

Resultados del diagrama de Schöeller – Berkaloff

En el diagrama de Schöeller – Berkaloff se tienen en cuenta los valores absolutos de las concentraciones de cada ion. A partir de los resultados de la caracterización hidrogeoquímica se clasifican las aguas subterráneas del Complejo Paleógeno a partir de las concentraciones de Cl^- , $SO_4^{=}$, HCO_3^- , como se muestra en la imagen 8.

Imagen 8. Diagrama de Schöeller - Berkaloff para los puntos de agua subterránea en época de lluvia y de estiaje del Complejo Paleógeno.

SCHÖELLER-BERKALOFF DIAGRAM



Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

Para la clasificación de los tipos de agua para el Complejo Paleógeno según Schöeller, los pozos Finca Santa Rita y Predio el Cucharó para las épocas de lluvia y de estiaje presentan agua clorurada normal, sulfatada normal e hipo bicarbonatada, esta anomalía en las concentraciones de bicarbonato se asocia probablemente a la formación donde se encuentra el agua, ya que la Formación Regadera presenta una composición pobre en carbonatos y silicatos razón por la cual el aporte de bicarbonatos es bajo.

4.3.3. Complejo Neógeno – Cuaternario

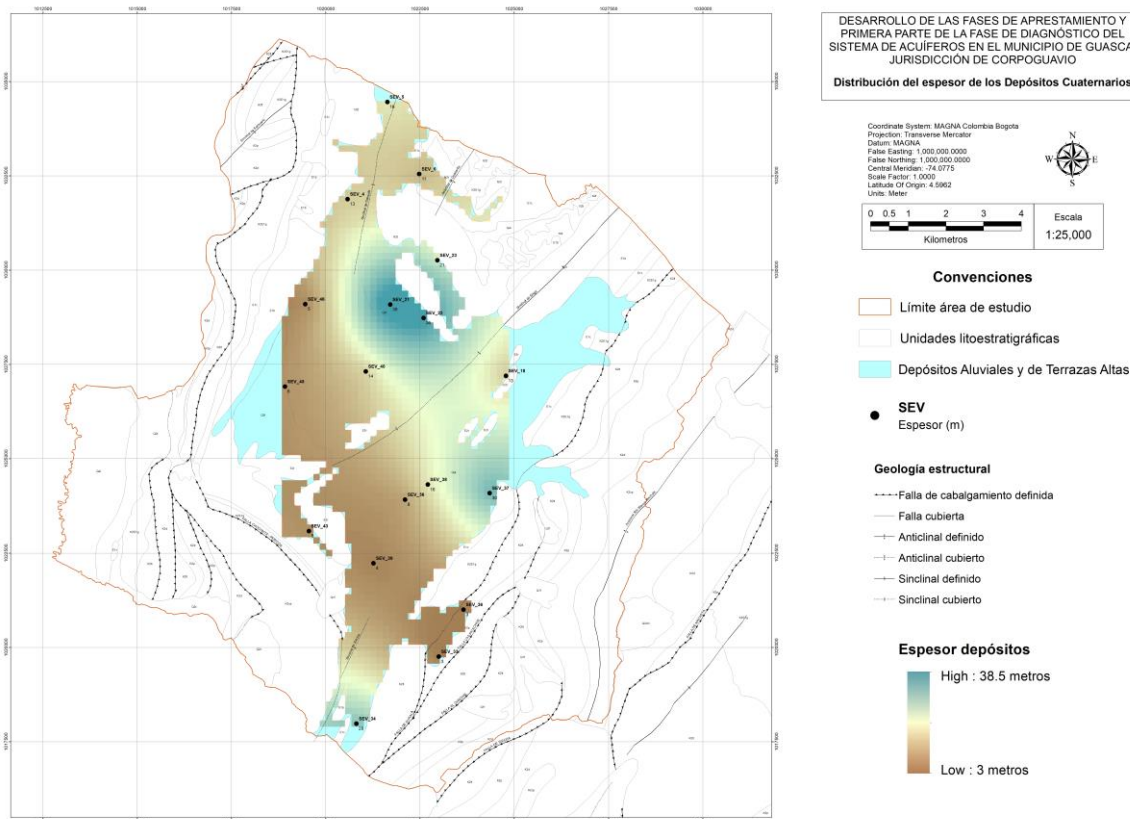
El Complejo Neógeno – Cuaternario está conformado por rocas sedimentarias del Plioceno y del Oligoceno del cual hacen parte la Formación Tiltatá, Los Depósitos Fluvioglaciares y Coluviales y los Depósitos Aluviales y de Terrazas Altas.

4.3.3.1. Generalidades

Suprayaciendo al Complejo Paleógeno, se encuentra la Formación Tiltatá compuesta por gravas y arenas, con variaciones de tamaño de grano que va desde limo a arena, envueltos en una matriz areno – gravosa, esta formación podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero de tipo multicapa, donde las capas de arena constituyen el acuífero y las capas arcillosas corresponden a capas confinantes a semiconfinantes.

En contacto discordante con la Formación Tiltatá y cubriendo el valle de Guasca y el valle de Teusacá, se encuentran los Depósitos Aluviales y de Terrazas Altas de origen fluvial y lacustre, los cuales está constituido por material no consolidado arcilloso, arenoso y gravoso, en un matriz areno – arcilloso, estos depósitos podrían clasificarse hidrogeológicamente como un acuífero, con un potencial hidrogeológico medio. El espesor de estos depósitos pudo ser definido a partir de los resultados de la exploración geofísica, con los cuales se construyó un mapa mostrando la distribución de dicho espesor, como se observa en la imagen 9. El mapa exhibe los mayores espesores de estos depósitos alrededor del SEV_21, SEV_22, SEV_37 y SEV_34, ubicados hacia el oeste de la vereda La Floresta, el centro de la vereda Santa Ana y noroeste de la vereda Trinidad.

Imagen 9. Mapa de distribución de los Depósitos Aluviales y de Terrazas Altas.



Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

Cubriendo los Depósitos Aluviales y de Terrazas altas, se encuentran los Depósitos Fluvioglaciares y Coluviales los cuales se caracterizan por presentar litologías de gravas y arenas de grano fino, no consolidados, envueltos en una matriz arenosa y bloques angulares a subangulares con matriz arenosa o arcillosa, esta formación podría clasificarse hidrogeológicamente como un acuitardo (medio de baja permeabilidad).

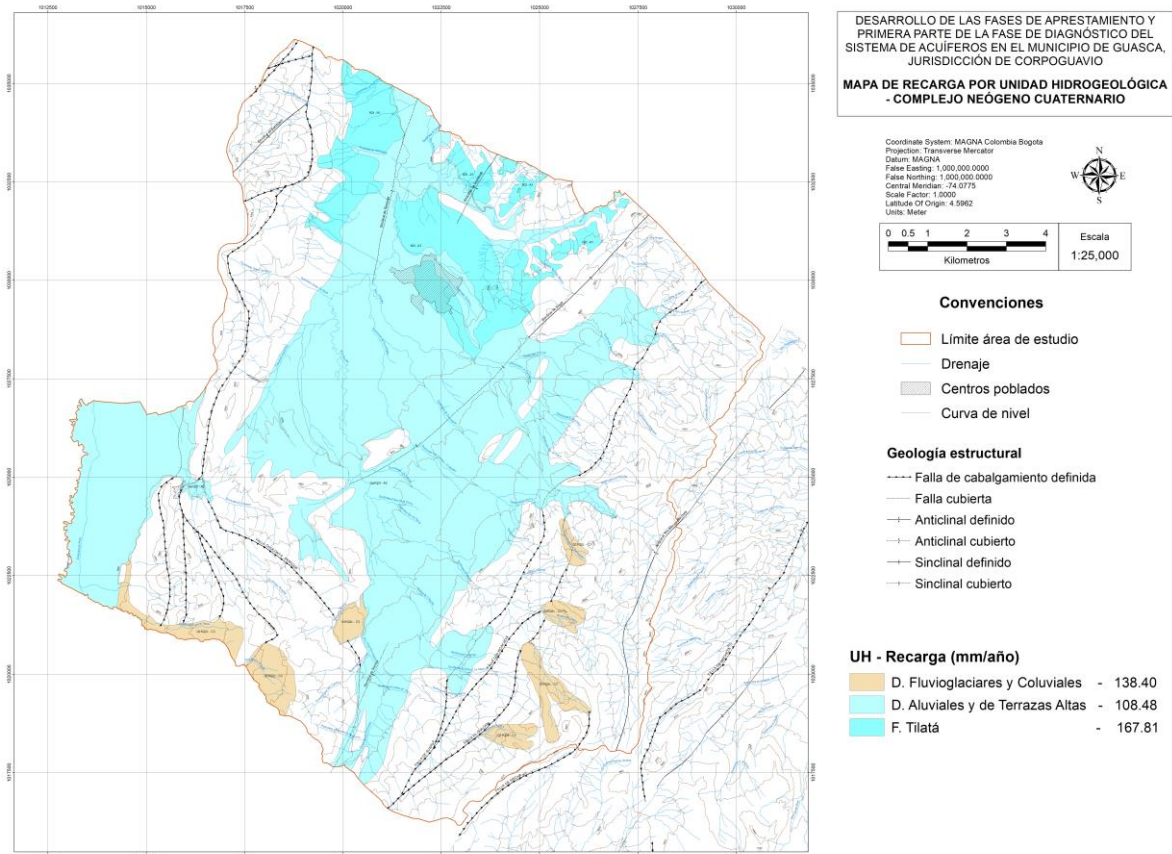
4.3.3.2. Áreas de recarga y descarga

Los acuíferos del Complejo Neógeno – Cuaternario, correspondientes a la Formación Tilatá y los Depósitos Aluviales y de Terrazas Altas, se destacan por presentar gran extensión, se distribuyen a lo largo del valle de Guasca y el valle del río Teusaca, donde tienen como principal fuente de recarga la infiltración directa de las aguas lluvias, gracias a su permeabilidad; a diferencia de los Depósitos Fluvioglaciares y Coluviales donde la recarga por precipitación se dificulta debido a su baja permeabilidad. Otra fuente de recarga para los Depósitos Aluviales y de

Terrazas Altas pueden ser los flujos subsuperficiales que se generan en las vertientes y que alimentan estos depósitos al llegar a las partes bajas.

A partir del balance hídrico de la humedad del suelo, se calculó la recarga potencial para las unidades acuíferas del Complejo Neógeno – Cuaternario. Para la Formación Tilatá, que cubre un área de 13,88 Km², se obtuvo un valor de recarga de 167,81 mm/año, los Depósitos Aluviales y de Terrazas Altas con un área de 77,16 Km² y una recarga de 108,48 mm/año, y los Depósitos Fluvioglaciares y Coluviales con un área de 6,53 Km² y una recarga de 138,40 mm/año, como se observa en la imagen 10.

Imagen 10. Mapa de recarga por unidad hidrogeológica – Complejo Neógeno Cuaternario



Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

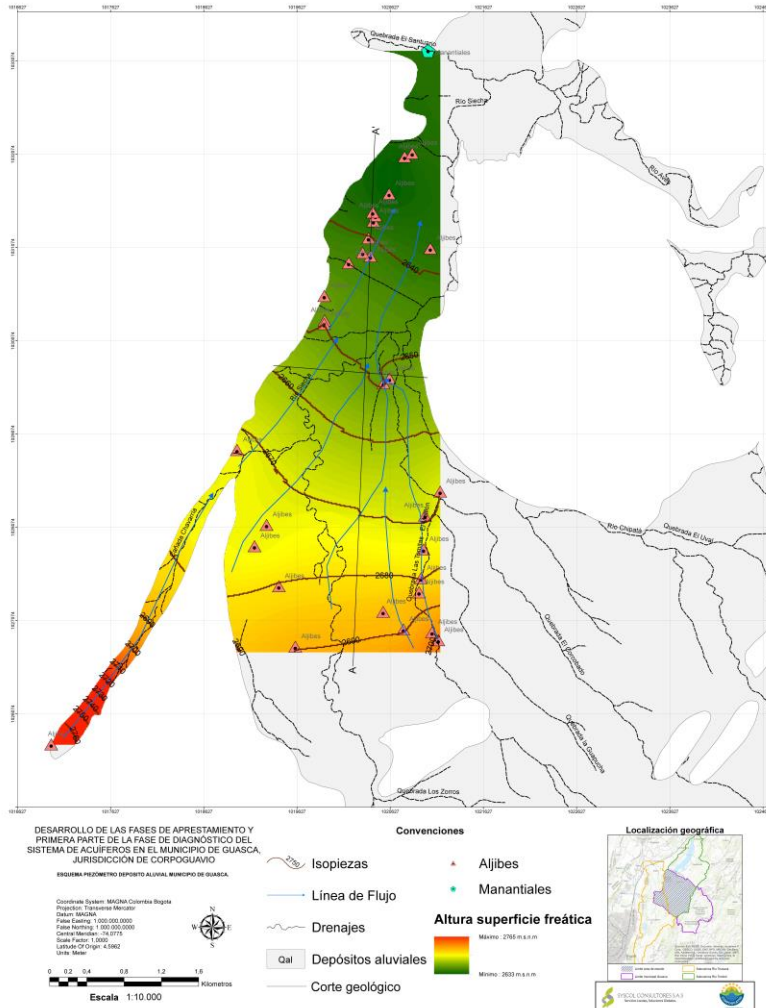
La descarga natural de las aguas subterráneas puede darse a través de los manantiales. Durante el inventario de puntos de agua, se reconocieron cuatro manantiales ubicados sobre los Depósitos Aluviales en las veredas Santa Bárbara, El Santuario y La Trinidad. Por otra parte, existen descargas artificiales por medio de tres pozos que captan las aguas subterráneas de los Depósitos Aluviales y de

Terrazas Altas, ubicados en las veredas La Trinidad, Santa Isabel y El Salitre. Para los dos primeros pozos, se determinó una profundidad de 150 y 75 metros, nivel estático de 3 y 5 metros, aportando un caudal de 1 L/s y 4 L/s, respectivamente. Para el pozo ubicado en la vereda El Salitre, no fue posible determinar los datos de profundidad, nivel estático y caudal.

4.3.3.3. Aspectos hidrodinámicos

Para realizar los aspectos hidrodinámicos del Complejo Neógeno – Cuaternario se realizó la lectura de los niveles estáticos de las aguas subterráneas para 35 puntos ubicados sobre los Depósitos Aluviales. A partir de la información recolectada se realizó el mapa de niveles freáticos mostrado en la imagen 11.

Imagen 11. Mapa de niveles freáticos para el Complejo Neógeno – Cuaternario.

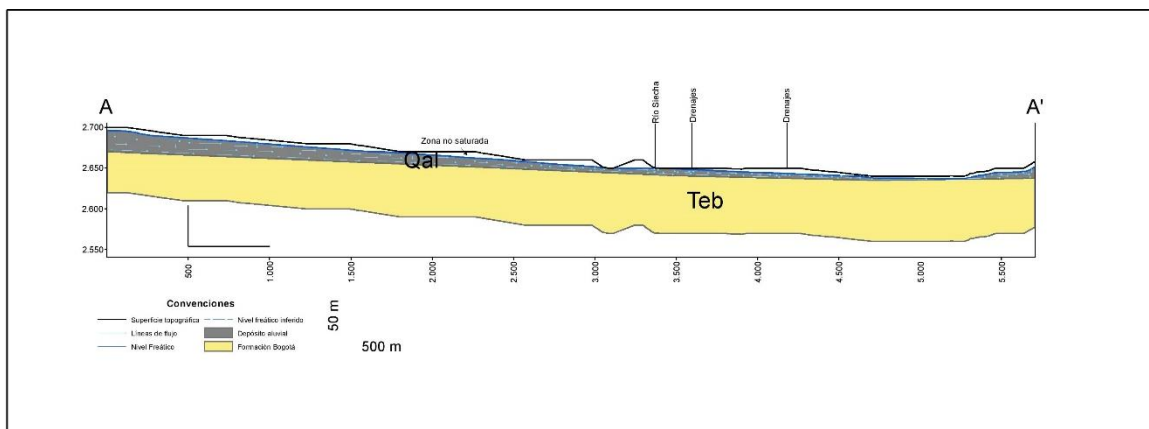


A partir del mapa de niveles freáticos para el Complejo Neógeno – Cuaternario se observa el patrón de flujo del agua subterránea, donde las alturas de las superficies freáticas registraron los valores más altos hacia el sur de la zona de estudio sobre la Vereda Santa Isabel, estos valores se acercan a los 2.760 m.s.n.m., las mediciones de alturas más bajas de superficies freáticas se encuentran ubicadas al norte del área de estudio, sobre la Vereda El Santuario, registrando valores cercanos a los 2.633 m.s.n.m., a partir de estas mediciones se generaron isopiezas que muestran la fluctuación de niveles freáticos y líneas de flujo, mostrando que el flujo preferencial del agua para el Complejo Neógeno - Cuaternario es en sentido sur – norte, con un aporte importante de aguas provenientes de la Cañada Chavarría, la quebrada Las Tomitas – el Motilón y el Río Siecha.

Mediante el corte geológico generado a partir del mapa de niveles freáticos mostrado en la imagen 12. se puede identificar que los Depósitos Aluviales se comportan como un acuífero libre y el flujo subterráneo generado por la recarga se infiltra hasta el contacto con la Formación Bogotá ya que se comporta como un acuitado evitando la infiltración a capas infrayacientes y su dirección de flujo preferencial es en sentido sur – norte.

Imagen 12. Corte geológico a partir del mapa de niveles freáticos.

ESQUEMA DIRECCIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA (DEPÓSITOS ALUVIALES)



Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

4.3.3.4. Evaluación hidráulica

La evaluación hidráulica del complejo Neógeno - Cuaternario se realizó mediante una prueba de bombeo a caudal constante en el pozo Unique Collection, localizado sobre la unidad Depósitos Aluviales, donde se estimaron los parámetros hidráulicos que se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Parámetros hidráulicos en las unidades del Complejo Neógeno - Cuaternario.

Unidad	Pozo	Época de realización de la prueba de bombeo	Profundidad del pozo(m)	Caudal (l/s)	Transmisividad (m ² /día)	Capacidad específica (l/s/m)
Depósitos Aluviales	Unique Colletion S.A	Lluvia	75	4	160	2,4
		Estiaje		2,89	90,22	1,6

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

Para los Depósitos Aluviales la transmisividad se encuentra en un rango de 90,22 a 160 m²/día y la capacidad específica se encuentra en un rango de 1,6 a 2,4 l/s/m. Los Depósitos Aluviales junto con los Depósitos de Terrazas Altas presentan un interés hidrogeológico medio para el área de estudio y constituyen acuíferos de extensión regional libres o confinados, no consolidados.

En el área de la Sabana de Bogotá forman complejos acuíferos de extensión regional heterogénea, multicapas. La heterogeneidad está reflejada en la variabilidad de los parámetros hidráulicos³⁸, la transmisividad varía de 12 hasta 900 m²/día, la conductividad hidráulica de 0,01 a mayor de 3 m/día. En la zona de almacenamiento los acuíferos son de tipo confinado a semiconfinado, los coeficientes de almacenamiento se encuentran en un rango entre $1,2 \times 10^{-3}$ y $2,8 \times 10^{-3}$ ³⁹.

Las mejores características hidrogeológicas de la Sabana de Bogotá las presenta la Formación Tilatá, sus transmisividades entre 150 y 900 m²/día y las conductividades hidráulicas mayores de 1 m/día los clasifican como depósitos muy permeables y de alta producción. Los pozos que captan estos niveles en la cuenca del río Subachoque y en las localidades de Briceño y Gachancipá producen caudales hasta los 40 l/s o más⁴⁰.

4.3.3.5. Caracterización hidrogeoquímica

La caracterización hidrogeoquímica para el Complejo Neógeno - Cuaternario se hizo a partir de los cuatro puntos de agua ubicados sobre los Depósitos Aluviales, a los cuales se les realizó análisis de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos para época de lluvia y de estiaje. La tabla 12 muestra los puntos de agua utilizadas para el análisis.

³⁸ BERMOUDES, O., y VELANDIA, F. Op. Cit., p. 46.

³⁹ INGEOMINAS Op. Cit.

⁴⁰ BERMOUDES, O., y VELANDIA, F. Op. Cit., p. 47.

Tabla 12. Puntos de agua ubicados sobre el Complejo Neógeno - Cuaternario, para la caracterización hidrogeoquímica.

Número	Nombre del punto	Tipo	Coordenadas		Profundidad (m)	Nivel (m)
1	Predio el Pino	Aljibe	N: 1027378	E: 1020937	12	6
2	Vereda San José	Aljibe	N: 1026979	E: 1020768	7	3
3	Finca María	Aljibe	N: 1028457	E: 1021163	4	3
4	Unique Colletion S.A.	Pozo	N: 1024475	E: 1014531	75	3

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

Los resultados obtenidos, se procesaron para realizar la caracterización hidrogeoquímica de las muestras de agua subterránea, para las unidades del Complejo Neógeno - Cuaternario, este procesamiento se hizo a partir de cálculos estadísticos descriptivos y el uso de diagramas hidrogeoquímicos (diagramas de Piper, Stiff y Schoeller). En la tabla 13 se presentan los resultados de las mediciones realizadas en campo sobre los cuatro puntos de agua subterránea, para el Complejo Neógeno - Cuaternario.

Tabla 13. Resultados de las mediciones realizadas en campo, en los puntos de agua subterránea del Complejo Neógeno - Cuaternario.

Parámetro	Aljibe Predio el Pino		Aljibe Vereda San José		Aljibe Finca María		Pozo Unique Colletion S.A.	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
pH	5,35	5,30	5,45	5,85	4,90	5,55	5,45	6,40
Temperatura (°C)	19,85	15,45	18,70	16,65	17,00	17,25	15,45	18,40
Conductividad Eléctrica (µS/cm)	0,80	400,00	475,00	700,00	7,35	9,65	50,00	340,00
Oxígeno Disuelto (mgO ₂ /L)	4,77	4,48	4,91	4,31	5,04	4,60	4,15	3,93
Oxígeno Disuelto (%)	73,75	70,85	78,50	66,83	74,61	71,95	56,70	51,85

Parámetro	Aljibe Predio el Pino		Aljibe Vereda San José		Aljibe Finca María		Pozo Unique Colletion S.A.	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
Turbiedad (UNT)	25,85	0,30	0,00	0,81	0,05	3,09	11,14	3,78

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

Los resultados de las mediciones en campo en épocas de lluvia y de estiaje para el pH muestran que las aguas subterráneas del Complejo Neógeno - Cuaternario son ácidas, ya que su pH oscila entre 4,90 y 5,45 para época de lluvia y 5,30 y 6,40 en época de estiaje, los valores de pH se encuentran dentro de los valores de las aguas naturales y dentro de los rangos admisibles por la normatividad colombiana. Los resultados de las mediciones de la conductividad eléctrica para el Complejo Neógeno - Cuaternario muestran que los valores se encuentran en un rango entre 0,80 y 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a una temperatura promedio de 18°C, los cuales se asocian a aguas dulces.

Adicionalmente, se realizó la caracterización de los puntos de agua subterránea ubicados sobre el Complejo Neógeno – Cuaternario para épocas de lluvia y estiaje a partir de los análisis de laboratorio. En la tabla 14 muestra los resultados de los cuatro puntos analizados.

Tabla 14. Resultados de las mediciones en el laboratorio para los puntos de agua subterránea en época de lluvia y de estiaje del Complejo Neógeno – Cuaternario.

Parámetro	Aljibe Predio el Pino		Aljibe Vereda San José		Aljibe Finca María		Pozo Unique Colletion S.A.	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	16,70	5,10	42,50	7,60	13,40	6,70	65,00	62,40
Nitratos (mgNO ₃ -/L)	0,71	0,75	137,43	111,64	309,99	222,57	0,05	0,05
Nitritos (mgNO ₂ -/L)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	3,01	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	2,92	0,99
Ortosfosfatos (mgPO ₄ /L)	<0,111	0,11	<0,111	0,11	<0,111	0,11	<0,111	0,11
Sólidos en solución (mg/L)	42,00	42,00	308,00	269,00	549,00	433,00	84,00	86,00

Parámetro	Aljibe Predio el Pino		Aljibe Vereda San José		Aljibe Finca María		Pozo Unique Colletion S.A.	
	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje	Lluvia	Estiaje
Sólidos totales (mg/L)	44,00	63,00	346,00	345,00	561,00	596,00	90,00	1287,00
Bicarbonatos (mg/CaCO ₃)	16,69	15,84	42,45	39,28	13,43	12,80	65,00	62,39
Cloruros (mgCl/L)	7,38	3,42	15,81	9,56	30,58	14,61	1,12	3,22
Sulfatos (mgSO ₄ /L)	4,61	2,65	39,56	26,00	105,32	79,45	4,61	4,61
Hierro (mgMetal/L)	0.791	0,15	0,32	0,15	0,43	0,242	7,25	9,65
Calcio (mgMetal/L)	6,93	2,631	48,50	28,320	72,60	59,12	4,91	4,73
Magnesio (mgMetal/L)	1,88	1,0240	23,20	15,13	30,90	21,43	4,20	2,57
Sodio (mgMetal/L)	8,14	4,611	22,50	13,41	22,30	15,97	29,40	14,30
Potasio (mgMetal/L)	2,15	1,4950	20,90	10,42	8,22	8,820	2,14	1,903
Arsénico (mgMetal/L)	0,01	0,0210	0,01	0,0045	0,01	0,0045	<0,004 5	0,0045
Acidez (mgCaCO ₃ /L)	33,40	4,90	10,50	6,70	11,70	5,80	20,90	10,40
Coliformes totales (NMP/100 mL)	187.2	19.863	279,00	17.250	24.196 ,00	21.050	441,00	1.5553,0 0
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	<1.8	10,00	18,00	7.701	107,00	8.664,0 0	10,00	1,00
Dureza (mg/L) CaCO ₃	25,05	10,79	216,60	134,22	308,50	235,88	29,54	22,39

Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S., 2017.

De acuerdo a los valores de concentraciones de CaCO₃ en los puntos de agua subterránea, del Complejo Neógeno – Cuaternario, se presentan cambios en el parámetro de la dureza. Para el Pozo Unique Colletion S.A, el agua se puede

clasificar como blanda en época de lluvia y de estiaje, como para el Aljibe Predio El Pino. Para el punto de agua subterránea que se encuentra en el Aljibe Vereda San José, se puede clasificar en dura y para el Aljibe Finca María se presenta un agua muy dura para las dos épocas. La dureza de las aguas se relaciona a las altas concentraciones en iones magnesio y calcio; lo que generan que las aguas aumenten su dureza y, por ende, no pueden ser usadas para uso doméstico a menos que sean sometidas a un proceso de tratamiento.

La alcalinidad de un agua determina la capacidad para neutralizar ácidos, en la mayoría de las aguas naturales está producida por los iones de carbonato y bicarbonato, el parámetro de alcalinidad en época de lluvia y de estiaje para el Pozo Unique Colletion se puede definir como alcalinidad TAC, al igual que el Aljibe Vereda San José en época de lluvia el cual puede neutralizar hasta un pH de 4,5, para el Aljibe Predio el Pino y Aljibe Finca María para las épocas de lluvia y estiaje se puede definir como una alcalinidad TA, capaz de neutralizar hasta un pH de 8,3.

De acuerdo a los parámetros de nitritos, nitratos y nitrógeno amoniacal de las aguas subterráneas, se puede determinar que para el Pozo Unique Colletion y el Aljibe Predio El Pino en épocas de lluvia y de estiaje presentan concentraciones bajas de nitritos y nitratos donde los valores se encuentran dentro de los límite admisibles establecidos por la normatividad colombiana para usos pecuarios; sin embargo, el valor del nitrógeno amoniacal excede estos límites permitidos, la presencia de este componente favorece la multiplicación microbiana y su detención en el agua se considera como un posible indicativo de contaminación reciente, este tipo de contaminación en el agua subterránea puede estar relacionada a procesos agrícolas o ganaderos. Los nitratos pueden estar presentes en las aguas subterráneas como resultado de la disolución de las rocas que lo contienen, los Aljibes Vereda San José y Finca María en épocas de lluvia y de estiaje presentan valores de nitratos que exceden los valores aceptables para este componente; indicando contaminación por su elevada concentración, este tipo de contaminación está relacionada a actividades ganaderas.

Los sulfatos proceden de la oxidación de sulfuros ampliamente distribuidos en las rocas sedimentarias y debido a la descomposición de sustancias orgánicas. Sin embargo, la disolución del yeso, la anhidrita y otros tipos de sulfatos dispersos, representa el aporte cuantitativamente más significativo de este ion en las aguas subterráneas. El contenido de sulfatos en las aguas subterráneas del Complejo Neógeno – Cuaternario para las épocas de lluvia y de estiaje presentaron en general concentraciones bajas, asociadas a los valores normales de aguas dulces.

Las concentraciones de sólidos en solución y sólidos totales para el Complejo Neógeno – Cuaternario son bajas, sin embargo, se reporta que para el Aljibe Vereda San José y el Aljibe Finca María para las épocas de lluvia y de estiaje y para el Pozo Unique Colletion S.A. en época de estiaje, existen concentraciones representativas,

esto se podría asociar principalmente al contenido de partículas, material de rocas, minerales y sales contenidos en las capas edáficas, pues sus profundidades, con excepción del Pozo Unique Colletion S.A., no sobrepasan los 7 metros, por tanto, se encuentran más cerca de la superficie y existe una mayor probabilidad de contener partículas disueltas.

Las concentraciones de hierro en el agua están controladas por procesos de equilibrio químico como oxidación – reducción, precipitación, disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros, así como por la actividad metabólica de las plantas y animales. De acuerdo a las concentraciones de hierro, los puntos monitoreados se encuentran dentro del rango de calidad admisible para la destinación del recurso para uso agrícola en las épocas de lluvia y estiaje, sin embargo, el Pozo Unique Colletion S.A. presenta un valor que sobrepasa el límite permitido para esta destinación para las dos épocas.

El calcio en las rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonato o de sulfato y el magnesio procede de la disolución de rocas carbonatadas, evaporitas y la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de aguas marinas. Los valores de calcio y magnesio en las aguas subterráneas del Complejo Neógeno – Cuaternario en las épocas de lluvia y de estiaje son bajos y se relacionan con aguas dulces naturales.

El potasio procede de la meteorización de feldspatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas. Para las concentraciones de potasio se evidenció que casi todos los valores de los puntos sobre el Neógeno – Cuaternario son inferiores a 10 mg/L, lo cual se asocia a concentraciones normales para aguas subterráneas, sin embargo, el Aljibe Vereda San José presentó un valor de 20,90 mg/L para la época de lluvia y 10,42 mg/L para la época de estiaje, estos valores se podrían asociar a indicios de contaminación por vertidos de aguas residuales.

En cuanto a los coliformes fecales y totales sus concentraciones en época de lluvia están en los valores admisibles por la normatividad colombiana, sin embargo, el Aljibe Finca María presenta valores que sobrepasan el rango permitido en las épocas de lluvia y estiaje; por otra parte, el Aljibe Predio el Pino, el Aljibe Vereda San José y el Pozo Unique Colletion S.A. sobrepasan el rango permitido en épocas de estiaje.

Resultados del diagrama de Piper

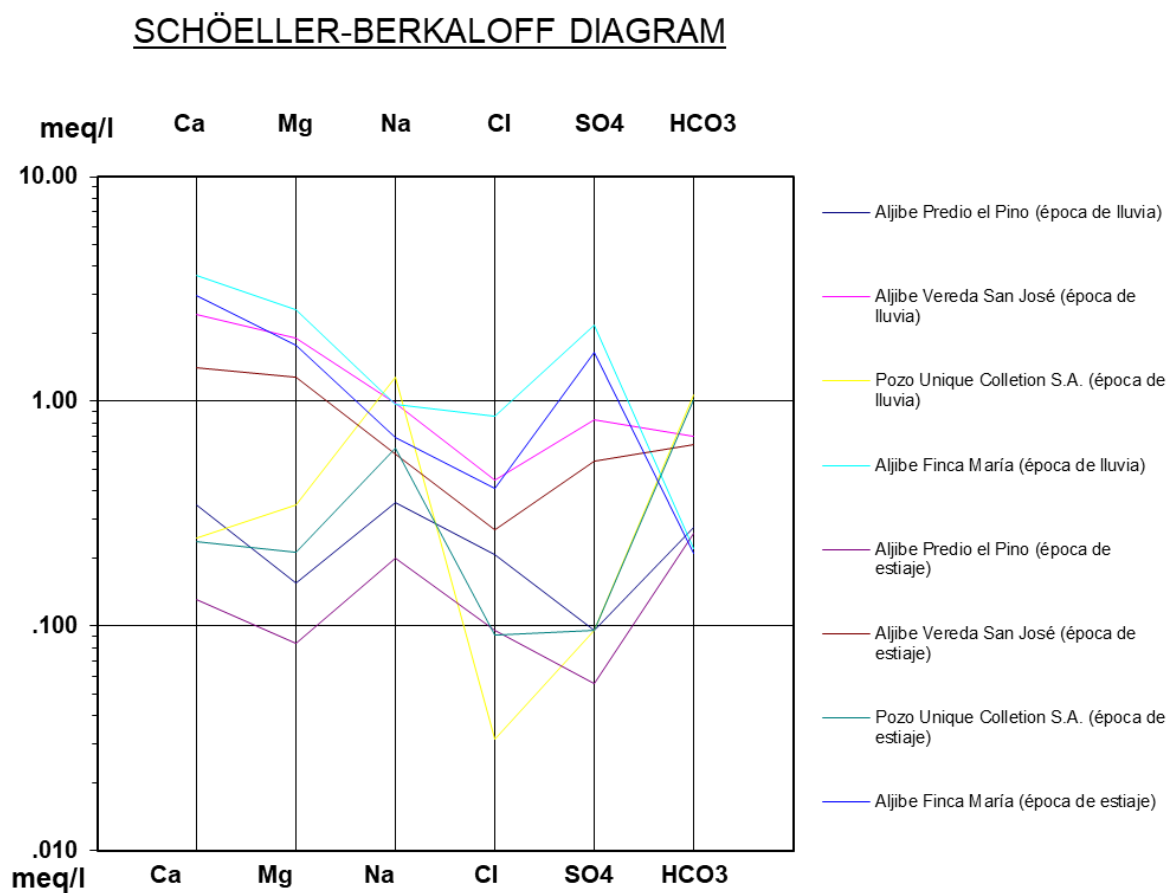
En el diagrama de Piper se representa la composición de agua deducida a partir de aniones y cationes, las aguas geoquímicamente similares para el Complejo Neógeno – Cuaternario se agrupan y clasifican en áreas bien definidas, como se muestra en la imagen 13.

sódica para las épocas de lluvias y estiaje, por último, el Aljibe Finca María presenta características de un agua sulfatada cálcica.

Resultados del diagrama de Schöeller - Berkaloff

En el diagrama de Schöeller – Berkaloff se tiene en cuenta los valores absolutos de las concentraciones de cada ion. A partir de los resultados de la caracterización hidrogeoquímica se clasificaron las aguas subterráneas del Complejo Neógeno - Cuaternario a partir de las concentraciones de Cl^- , $SO_4^{=}$, HCO_3^- , como se muestra en la imagen 14.

Imagen 14. Diagrama de SCHÖELLER-BERKALOFF para los puntos de agua subterránea en época de lluvia y de estiaje del Complejo Neógeno - Cuaternario.



Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

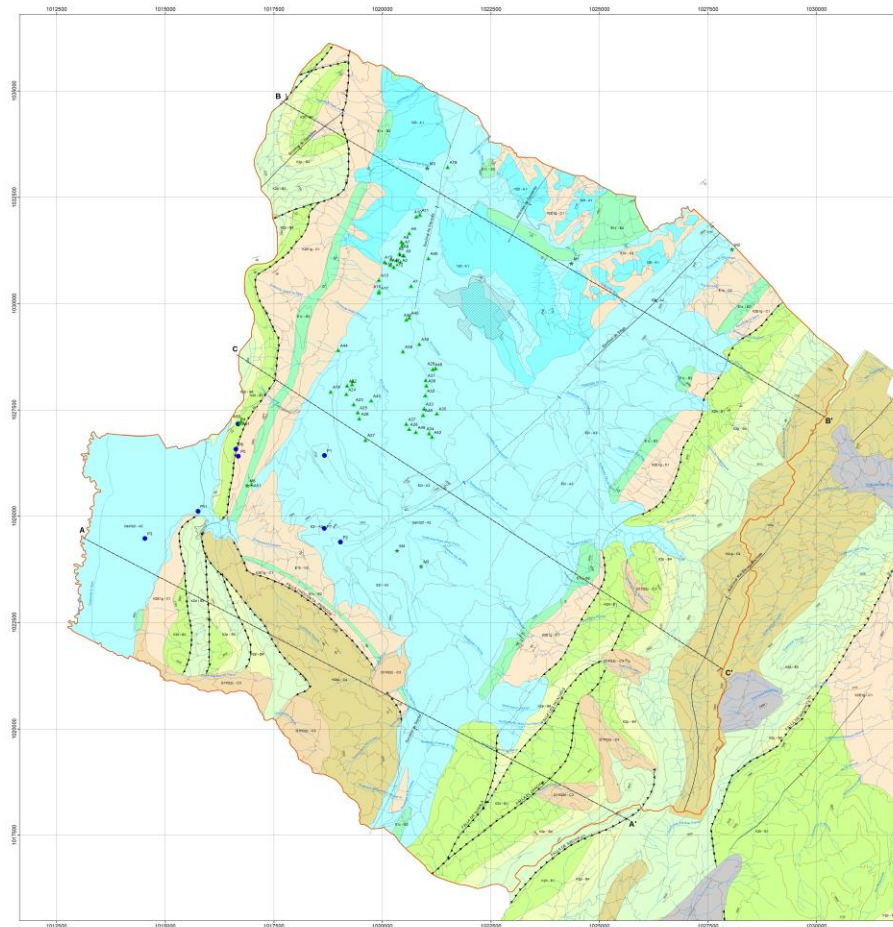
Para la clasificación de los tipos de agua para el Complejo Neógeno – Cuaternario en épocas de lluvia y de estiaje según Shöeller, el Pozo Unique Colletion S.A.

presenta concentraciones de cloruros y sulfatos normales, sin embargo, presenta concentraciones bajas de bicarbonatos asociada posiblemente a la composición de los depósitos donde se encuentra. Para los aljibes Predio el Pino, Vereda San José y Finca María presentan concentraciones de cloruros y sulfatos normales, sin embargo, se presenta una anomalía en la concentración de bicarbonatos lo cual se asocia probablemente a su cercanía con la superficie, por lo que posiblemente sea una mezcla de agua de infiltración y agua subterránea proveniente del acuífero.

4.4. MAPA Y CORTES HIDROGEOLÓGICOS

A partir del análisis e integración de información primaria y secundaria se creó el modelo hidrogeológico conceptual que enmarca el municipio de Guasca, Cundinamarca, donde se identificaron y caracterizaron las unidades hidrogeológicas existentes siguiendo la metodología inicialmente propuesta. Los resultados del presente estudio son resumidos y expuestos gráficamente mediante el mapa hidrogeológico que se muestra en la , donde se exhiben las propiedades hidrogeológicas de cada una de las unidades. Adicionalmente, se construyeron cortes hidrogeológicos a partir del mapa, como se observa en la imagen 15; **Error! o se encuentra el origen de la referencia.**, donde se expone el comportamiento hidrogeológico en el área de estudio.

Imagen 15. Mapa hidrogeológico del área de estudio.



DESARROLLO DE LAS FASES DE APRESTAMIENTO Y PRIMERA PARTE DE LA FASE DE DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ACUÍFEROS EN EL MUNICIPIO DE GUASCA, JURISDICCIÓN DE CORPOGUAYO

MAPA HIDROGEOLÓGICO

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: MAGNA
 False Easting: 1.000.000.000
 False Northing: 1.000.000.000
 Central Meridian: -74.0775
 Scale Factor: 1.0000
 Latitude Of Origin: 4.5962
 Units: Meter



Convenciones

- Limite área de estudio
- Drenaje
- Centros poblados
- Curva de nivel
- Corte hidrogeológico

Geología estructural

- Datos estructurales, estratificación
- Falla de cabalgamiento definida
- Falla cubierta
- Anticinal definido
- Anticinal cubierto
- Sinclinal definido
- Sinclinal cubierto

Inventario de puntos

- ▲ Aljibes
- ★ Manantiales
- Pozos

UNIDADES Y CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	CAUDAL (L/s)	TRANSIMISIVIDAD (m ² /s)	CAPACIDAD ESPECÍFICA (L/lm)	RESISTIVIDAD ohm-m
Rocas y/o sedimentos con flujo integrador y potencial primario				
K2a-A1 La unidad A1 corresponde a acuíferos de tipo multigrupo de la Formación Tiroa, conformados esencialmente por arenas y conglomerados, con una heterogeneidad alta. Potencial hidrogeológico de medio a alto.	12,2 - 1,20 [*]	T=150 - 900 [*]	1,375 - 0,24 [*]	15 - 74
E2a-A2 La unidad A2 corresponde a acuíferos confinados a la base de la Formación La Paz, presentan heterogeneidad baja. Capacidad hidrogeológica media.	1,0	T=0,8 - 3,3	0,019 - 0,025	73 - 2.200
DwD2-A2 La unidad A2 corresponde a los acuíferos de tipo multigrupo de las Unidades Alvarado y El Estero de los Hornos, que en conjunto presentan heterogeneidad media. Potencial hidrogeológico medio.	4,0	T=80,22 - 190	1,6 - 2,4	2 - 2.800
Rocas porosas y/o fracturadas / potencial primario				
K2b-B1 La unidad B1 corresponde a los acuíferos de tipo multigrupo tipo integrador y a través de fracturas de tipo conductivo de la Formación Alvarado de tipo "Tiroa", presentan heterogeneidad baja. Potencial hidrogeológico medio a alto.	2,0	T= 9,24 - 10,27	0,13 - 0,14	5 - 2.100
E1c-B2 La unidad B2 corresponde a los acuíferos de tipo conductivo tipo integrador y a través de fracturas de la Formación Castro, presentan heterogeneidad muy baja. Potencial hidrogeológico medio a alto.	0,1	T=5,1	0,096	110 - 415
K2d-B3 La unidad B3 corresponde a los acuíferos con flujo multigrupo a través de fracturas de la Formación Dora Borrero, presentan heterogeneidad media y baja. Potencial hidrogeológico medio.	0,5 - 20 [*]	T= 200 - 480 [*]	0,8 [*]	10 - 2.800
K2e-B4 La unidad B4 corresponde a los acuíferos de tipo conductivo a través de fracturas de la Formación Placeres, conformados por arenas y conglomerados heterogeneidad muy alta. Potencial hidrogeológico medio a alto.	2,4 - 0,20 [*]	T= 2 [*]	0,07 - 0,003 [*]	9 - 3.500
Rocas con flujo limitado de agua subterránea				
K2E1g-C1 La unidad C1 corresponde a los acuíferos de la Formación Guasca, se almacena en capas de areniscas fracturadas de esta formación, existen conductos que confinan a libre de baja productividad, que permiten almacenar el agua subterránea. Capacidad hidrogeológica baja. Potencial hidrogeológico bajo.	1,2 - 0,75 [*]	T= 4 - 5 [*]	0,75 - 0,24 [*]	1 - 190
E1h-C2 La unidad C2 corresponde a los acuíferos de la Formación Guasca, se almacena en capas de areniscas fracturadas a partir de las capas de areniscas que conforman el grupo de la Formación Guasca, presentan heterogeneidad media y baja. Potencial hidrogeológico bajo.	2,4 - 0,20 [*]	T= 2 [*]	0,07 - 0,003 [*]	1 - 195
DwD2-C3 La unidad C3 corresponde a los acuíferos de tipo multigrupo de la Formación Guasca, presentan heterogeneidad muy baja. Potencial hidrogeológico muy bajo.	1,2 [*]		0,004 [*]	400
K2ip-C2 La unidad C4 corresponde a los acuíferos de la Formación Guasca, se almacena en capas de areniscas fracturadas, que conforman el grupo de la Formación Guasca, presentan heterogeneidad media y baja. Potencial hidrogeológico muy bajo.				3 - 880

* datos tomados de información secundaria

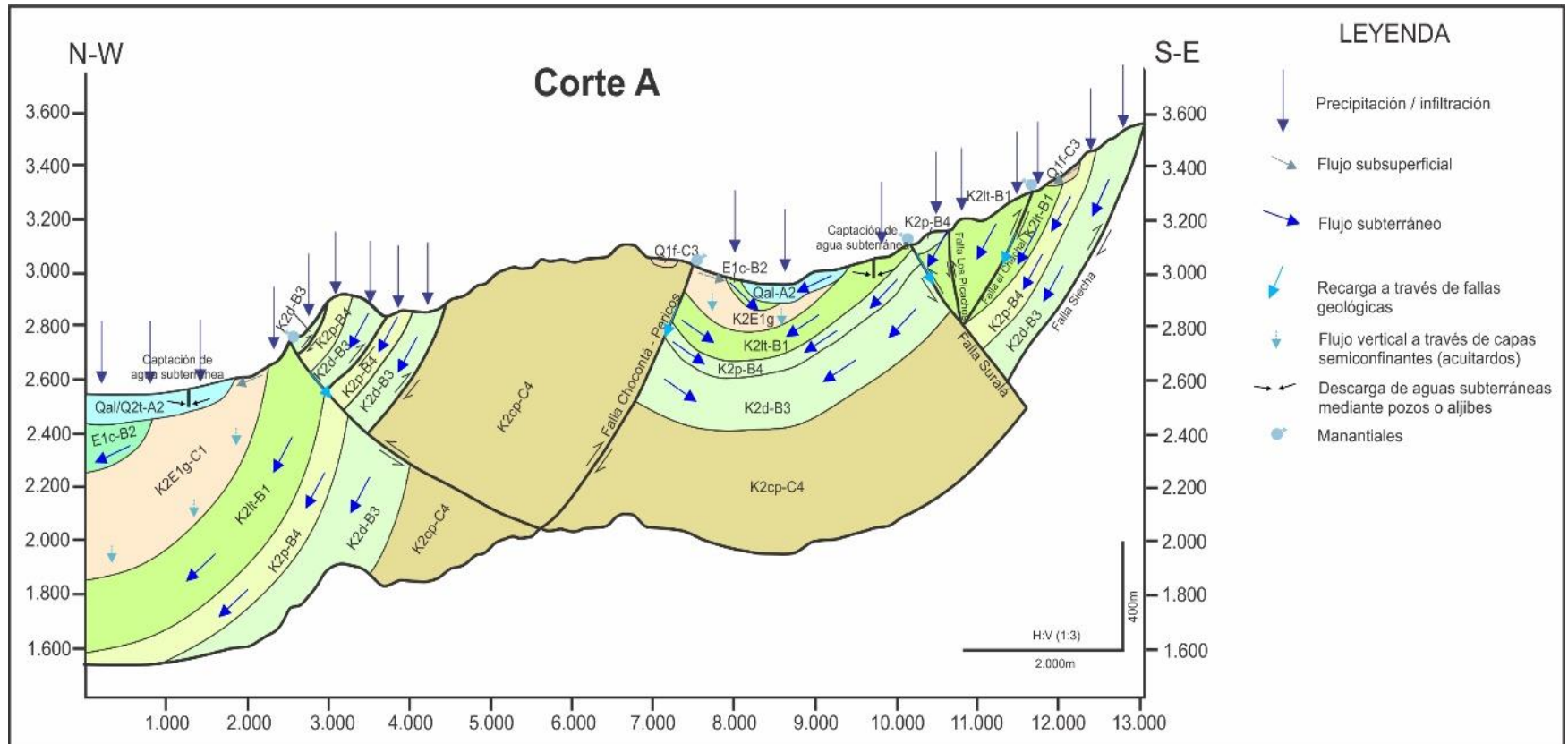
Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

Para el Complejo Cretácico, compuesto por las formaciones Chipaque, Guaduas, Arenisca de Labor y Tierna y el Grupo Guadalupe, la principal fuente de recarga son las precipitaciones, ya que las rocas del Grupo Guadalupe afloran en cadenas montañosas las cuales son consideradas zonas potenciales de recarga; sin embargo, la Formación Chipaque y la Formación Guaduas restringen la infiltración al ser unidades de baja permeabilidad, por lo cual generan flujos subsuperficiales que pueden ser absorbidos en rocas de mayor permeabilidad. La descarga de las aguas subterráneas para este complejo puede darse a través de manantiales o pozos profundos actualmente activos.

Para el Complejo Paleógeno, compuesto por las formaciones Cacho, Bogotá y La Regadera, la principal fuente de recarga son las precipitaciones, que por procesos de infiltración alimentan los acuíferos de la Formación Cacho y la Formación La Regadera; pero los niveles poco permeables de la Formación Bogotá dificultan y restringen la infiltración, generando flujos subsuperficiales que pueden ser absorbidos por niveles permeables más profundos. La descarga de las aguas subterráneas para este complejo puede darse a través de manantiales o pozos profundos.

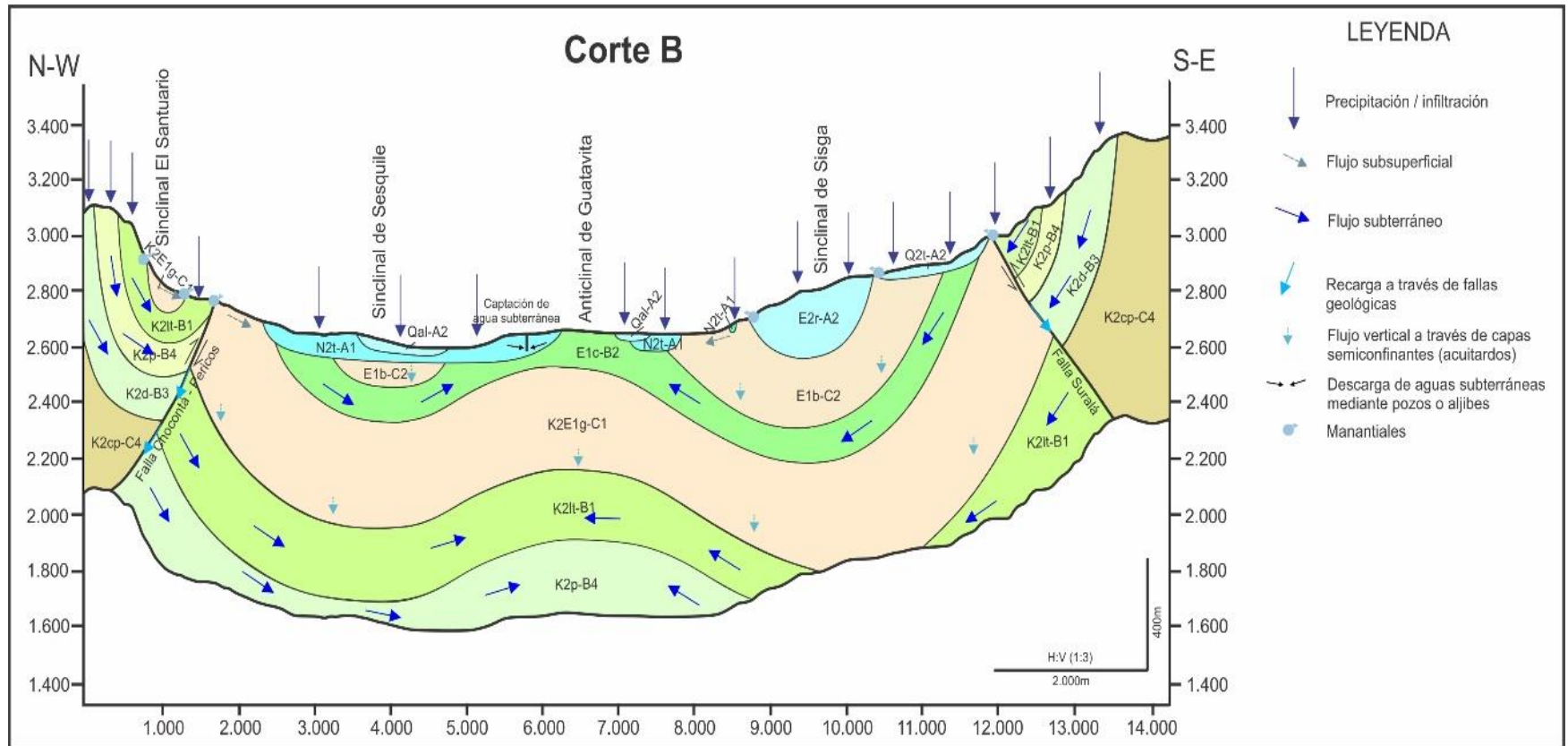
Para el Complejo Neógeno – Cuaternario compuesto por la Formación Tiltatá y los Depósitos Aluviales y de Terrazas Altas, la principal fuente de recarga se encuentra asociada a la infiltración directa de las aguas lluvia y a los flujos subsuperficiales que se generan en las vertientes; la descarga de las aguas subterráneas para este complejo puede darse a través de manantiales y puntos captadores de agua (pozos o aljibes).

Imagen 16. Corte (A) hidrogeológico conceptual del municipio de Guasca, Cundinamarca



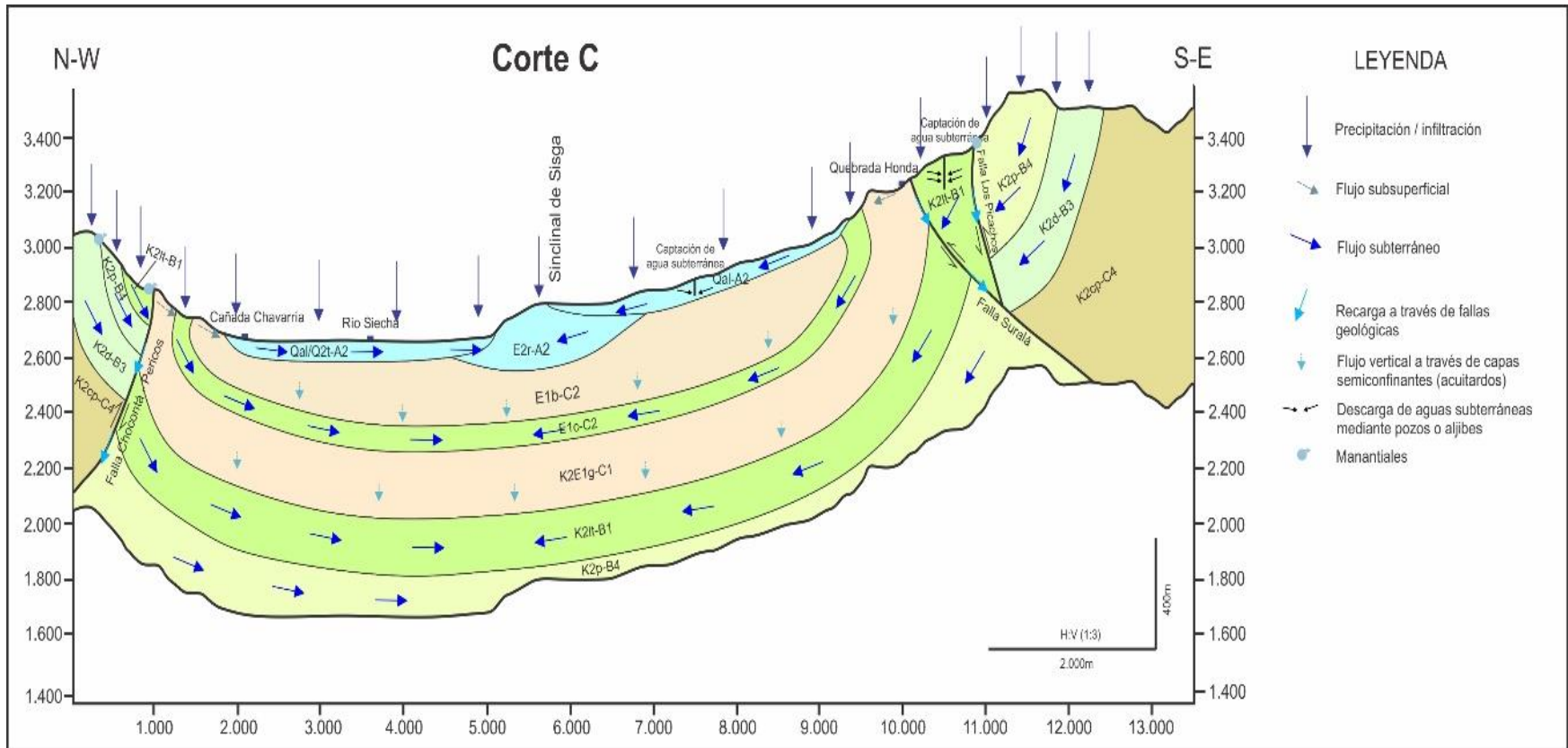
Fuente: SYSYCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

Imagen 17. Corte (B) hidrogeológico conceptual del municipio de Guasca, Cundinamarca



Fuente: SYSCOL CONSULTORES S.A.S. 2017.

Imagen 18. Corte (B) hidrogeológico conceptual del municipio de Guasca, Cundinamarca



Fuente: SYSVOL CONSULTORES S.A.S. 2017.



BIBLIOGRAFÍA

ALVAREZ OSEJO, Alberto. Estudio hidrogeológico cuantitativo de la Sabana de Bogotá. Informe Hidrogeológico del sector Sisga-Tibitó y Embalse de Tominé, Sabana de Bogotá. Bogotá: Ingeominas., 1993.

ALVAREZ Osejo, Alberto. Acuíferos de la Formación Tilatá (Mioceno-Plioceno) en dos pozos del Suroeste de la Sabana de Bogotá. En: Geología Colombiana. 1998, vol. 23, p. 79-95.

BERMOUDES, Olga. y VELANDIA, Francisco. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá. Bogotá: Ingeominas., 2002a.

BERMOUDES, Olga. y VELANDIA, Francisco. Hidrogeología regional de la Sabana de Bogotá. Bogotá: Ingeominas., 2002b.

BRICEÑO, Luis y ARANGO, Irene. Modelamiento Geoeléctrico y Gravimétrico de un sector del suroeste de la Sabana de Bogotá. En: Geofísica Colombiana. 2000. no. 4, p. 43-60.

CAR. Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Cuenca del río Bogotá. Bogotá: Ecoforest Ltda – Planeación Ecológica Ltda., 2006.

CORPOGUAVIO. Estudio de zonificación para racionalizar el aprovechamiento de aguas subterráneas y actualización de expedientes de pozos profundos en el municipio de Guasca (Cundinamarca). Bogotá D.C: García González Ltda., 2000.

CORREDOR, V., y TERRAZA, R. Geología de la plancha 228 Bogotá Noreste. Bogotá: SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO., 2015.

CASTELLANOS Estefanía y CETINA María. Determinación de patrones de fracturamiento y análisis cinemático en inmediaciones del Municipio de Charta, Macizo de Santander. Trabajo de grado Geóloga. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Geología, 2013. 151 p.

EAAB. Estudio de factibilidad para el aprovechamiento adicional de la Cuenca alta del río Tunjuelo. Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá., 1989.

EMPRESA COLOMBIANA DE PERFORACIÓN LTDA. Prospección de aguas subterráneas Vereda Las Flores en el municipio de Guasca – Cundinamarca. Bogotá, D.C., 2010.



GONZALEZ DE VALLEJO, L, et al. Ingeniería Geológica. Madrid: Pearson Prentice Hall, 2002. 744p.

HELMENS, K. Neogene-Quaternary geology of the High Plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia. Berlín: Editorial Gebrüder Borntraeger. 202 pág., 1990, Citado por CORREDOR y TERRAZA. Op. Cit., p. 79.

INGEOMINAS – DIVISIÓN HIDROGEOLOGÍA. Mapa hidrogeológico – Sector Sisga, Tibitó y Embalse de Tominé: Ingeominas., 1992.

INGEOMINAS. Caracterización Geoquímica e isotópica de los acuíferos de la Cuenca Alta del río Bogotá. Bogotá D.C: CAR., 2001.

JULIVERT, M. Los rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. En: Boletín de Geología. 1963. vol.13, no. 1.

MCLAUGHLIN, D. H., y ARCE, M. Geology of the Zipaquirá area (zone IV), Cordillera Oriental, Colombia. Informe preliminar No.109, 336 pág. Sogamoso: INGEOMINAS., 1972, Citado por CORREDOR y TERRAZA. Op. Cit., p. 55.

MONTOYA, D., y REYES, G. Geología de la plancha 209 Zipaquirá. Bogotá: INGEOMINAS., 2003.

MONTOYA y REYES. MONTOYA, D., y REYES, G. Geología de la Sabana de Bogotá. Bogotá: INGEOMINAS., 2005.

PEREZ, G. y SALAZAR A. Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. En: Geología Colombiana. 1978. no.10, p. 6-85.

RODRIGUEZ, Cesar y JIMENEZ, German A. Datación del agua subterránea en la Sabana de Bogotá y sus implicaciones Hidrogeológicas. En: Geología Colombiana, 1986. no.15, p. 205-218.

ROBLES, Emiro. Hidrogeología de la Cuenca del río Teusaca, Sabana de Bogotá. Bogotá: Ingeominas., 1993.

SINGHAL, Brij Bhusan Saran y GUPTA, Ravi P. Applied hydrogeology of fractured rocks. Roorkee, India: Springer Science & Business Media, 2010. 415 p. ISBN 978-90-481-8799-7.

ULLOA, A. y GÓMEZ, S. Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la región central del Departamento de Santander. ACUERDO ESPECIFICO, 2007, vol. 2, p. 2005.